



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

*Puesta en marcha de un Laboratorio
para la producción de Biogás en
Nicaragua*

Autor: Francisco Javier Luis Rodríguez

Tutor UC3M (España): Antonio Aznar Jiménez

Tutores UNI (Nicaragua): María Teresa Castillo Rayo

Edgar Somarriba Lezama

OCTUBRE 2010



Título: Puesta en marcha de un laboratorio para la producción de biogás en Nicaragua.

Autor: Francisco Javier Luis Rodríguez.

Tutor: Antonio Aznar Jiménez.

EL TRIBUNAL

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 29 de octubre de 2010 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

Agradecimientos

Este proyecto es la culminación de mis estudios, pero sin duda el punto final a un duro camino que he tenido que recorrer hasta poder coronar la cima de este Everest particular y donde sin el apoyo de ciertas personas no hubiera sido posible.

No puedo olvidarme de los ‘nicas’ que han dejado marcado un pedacito de mí después de mi periplo en este país de América Central gracias a su hospitalidad, humildad y cercanía que han hecho sentirme como en casa. A Palma, Sheila y Dylan por las risas y los buenos momentos que hemos compartido. A Godinez porque no olvidaré que me entregaron a ti como un paquetito el primer día, pero a partir de ahí nació una gran amistad, te echaré de menos. A Katia y familia por tratarme como a un amigo de toda la vida desde el primer segundo. A Tere y Somarriba por luchar codo con codo para que saliera adelante este proyecto. A todos los chicos de UNEN-IND que siempre han estado ahí en estos tres meses, Beto, Flaco, Maicol y Herling.

Del otro lado, capítulo especial a mis abuelos, mis padres, mis hermanos y resto de mi familia. Sin ellos, su apoyo, su paciencia y su saber estar este camino habría sido imposible. Sé que este día será especial para mi madre que ha sido la que también ha cargado la losa conmigo acompañándome en el camino y que le hará especial ilusión verme defender mi segundo Proyecto Fin de Carrera. A Diego y Alber por todos los grandes momentos que hemos vivido juntos y por los que nos quedan por vivir. A Rober, Pearson, Borja, Ruthy, Irene, Edu Alonso, Uzquiano, Jandro y resto de gente de BEST que me han hecho aprender y compartir momentos inolvidables. A Juanjo, Dami, Pablo, Jairo y Paco por ser mis amigos de siempre en Tenerife. Por último y no por ello menos importante, a mi novia Mery, que el título de Ingeniero Industrial es tanto suyo como mío, puesto que lo ha sufrido y lo ha luchado conmigo, compartiendo los buenos y malos momentos. Gracias por estar ahí y que viva la versión 2.0 y sucesivas mejoras.

Resumen

Este Proyecto Fin de Carrera (PFC) surge a partir de un Programa de Cooperación Interuniversitaria (PCI) entre la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) de Managua (Nicaragua). Este PCI obtuvo financiación y apoyo en la III Convocatoria de Ayudas para Acciones de Cooperación al Desarrollo que convocó la Universidad Carlos III de Madrid en junio de 2009. De este modo, la participación en dicho PCI sirve para darle un impulso al mismo en su desarrollo y de forma paralela, para que dicho trabajo sirva para la realización de este PFC.

En principio, antes de llegar a Nicaragua los objetivos de partida de este PFC según el papel era poner en marcha el laboratorio y los digestores que se habían proyectado, que en teoría, ya habían pasado la etapa de diseño, cálculo y construcción. Sin embargo, al llegar a Nicaragua no se había habilitado todavía un espacio para establecer el laboratorio y los dos digestores anaerobios de capacidad 210 l cada uno les habían dado problemas de fugas. Estos problemas, principalmente, se cree que habían sido por dos motivos: o bien un posible mal estado de alguna de las tomas o bien, una manipulación indebida por alguno de los alumnos de la UNI al ir a curiosear.

De este modo, tras saber el estado real de la situación, se opta por reformular el proyecto y hacer una planificación en base a mi estancia de 3 meses en Nicaragua. En este tiempo se ha ido trabajando de forma paralela: por un lado, en el acondicionamiento y equipamiento del laboratorio de biomasa (utensilios, aparatos, etc.) y por otro lado, cambiando a hacer 5 digestores anaerobios de menor tamaño, de los cuales, 2 de ellos irían con “camisa de agua”, para que actuase como sello hidráulico y para controlar la temperatura del medio en el que evoluciona la digestión anaerobia. Con estos cambios, podríamos probar en paralelo varios sustratos diferentes, en condiciones diferentes de desarrollo y así, obtener más datos que nos ayuden a obtener conclusiones sobre la calidad del biogás obtenido en Nicaragua.

Palabras clave: cooperación, digestor anaerobio, laboratorio, biogás, anaerobio.

Abstract

This Thesis births thanks to an Internship Cooperation Program (ICP) between Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) and Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) from Managua (Nicaragua). This ICP received financial support from “III Convocatoria de Ayudas para Acciones de Cooperación al Desarrollo” rised up by UC3M in June 2009. So, the participation in this ICP works in two ways: to develop the ICP in time and at the same time, all this work helps me to make my Thesis.

At the beginning, before coming to Nicaragua we had some objectives: start up the lab and the anaerobic digesters which had been designed, calculated and built before. But, when I arrived to Nicaragua it hadn't been assigned a place to build up the lab yet by UNI and the two anaerobic digesters of 210 liters capacity were experiencing problems about running out the biogases. These problems were caused, mainly, by two possible reasons: some fails in the connections or maybe because of an inappropriate use of some students from UNI without knowledge or permission to do it.

So, after knowing the real status of the situation, we decided to remake a new plan for the project, changing some phases and planning everything according to my period of three months in Nicaragua. During this time we have been working in two ways at the same time: for one side, we have been making some jobs to prepare the lab and buying the different stuff necessary to develop the experiments and on the other side, we have decided to make 5 anaerobic digesters with less capacity, where two of them, should be working in an atmosphere of water to control the temperature of work and make the hydraulic sealant. Thanks to these changes, we could work at the same time with different substrates in different environments and as a result, obtain more data to help us to make conclusions and analysis about the quality of the biogas in Nicaragua.

Keywords: cooperation, anaerobic digester, lab, biogas, anaerobic.

Índice

Agradecimientos.....	iii
Resumen	iv
Abstract.....	v
Índice	vi
Índice de figuras	x
Índice de Tablas.....	xiii
Glosario	xiv
Equivalencias de Unidades.....	xiv
1 Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos antes de estar en Nicaragua.....	2
1.3 Objetivos después de llegar a Nicaragua: Reformulación.....	3
1.4 Esquema del documento.....	4
2 Estado del Arte	6
2.1 Introducción.....	6
2.1.1 Un poco de historia. Comienzos.....	6
2.1.2 China e India.....	7
2.1.3 Alemania promociona la tecnología del biogás en el Sur	7
2.1.4 Proyecto de biodigestores en Nicaragua.....	8
2.2 Definición valores característicos.....	10
2.3 Tipos de Biodigestores	13
2.3.1 Biodigestores discontinuos	13
2.3.2 Biodigestores Semi-continuos	13



2.3.3 Biodigestores de mezcla completa	14
2.3.4 Biodigestores de Segunda y Tercera Generación	16
2.4 Biodigestor Elegido: Batch.....	17
2.4.1 Manómetro de Columna de Líquido.....	19
2.4.2 Carga del Biodigestor Batch.....	21
2.4.3 Mantenimiento del Biodigestor	24
2.5 Proceso Digestión Anaerobia	24
2.5.1 Temperatura y Tiempo de Residencia	26
2.5.2 La relación C/N	28
2.5.3 El pH.....	28
2.6 Sustratos para obtener biogás	30
2.6.1 Usos del biogás.....	34
2.7 Ventajas de los digestores anaerobios	37
2.8 Calorímetro de Junkers.....	38
2.8.1 Ventajas, desventajas y tipos de calorímetros	40
2.8.2 Método utilizado para obtener el poder calorífico inferior.....	40
2.9 Orsat	40
2.9.1 Funcionamiento	40
2.9.2 Descripción.....	42
2.9.3 Desarrollo Teórico.....	43
3 Memoria Justificativa	44
3.1 Conceptos teóricos de cálculo	44
3.2 Cálculos biodigestor	44
3.3 Cálculos nuestro biodigestor	47
3.4 Cálculos calorímetro.....	48

3.4.1	PCI biogás	49
3.5	Comparativa de resultados, análisis y conclusiones	52
3.6	Trabajos futuros: Posibilidades y Líneas de trabajo	53
3.6.1	Posibilidades	53
3.6.2	Líneas de Trabajo	54
4	Cronología del Proyecto: Cuaderno de Bitácora	55
4.1	Bloque I – 15 Julio – 15 de Agosto	55
4.2	Bloque II – 16 Agosto – 12 de Septiembre	57
4.3	Bloque III – 13 Septiembre – 12 de Octubre	64
5	Construcción un Biodigestor tipo Batch	74
5.1	Materiales necesarios	74
5.2	Herramientas necesarias	75
5.3	Construcción paso a paso	75
5.4	Consejos constructivos	79
6	Laboratorio Biomasa UNI-UC3M	81
6.1	Emplazamiento	81
6.2	Adecuación del laboratorio	81
6.3	Equipos instalados	83
6.4	Material y equipamiento del Laboratorio	84
6.5	Ensayos realizados	85
6.6	Proyectos de futuro	85
7	Presupuesto	87
7.1	Acondicionamiento del Laboratorio	87
7.2	Mobiliario Laboratorio	88



7.2.1 Estructuras metálicas para el soporte de los biodigestores y la mesa de laboratorio.....	88
7.3 Material y equipos laboratorio.....	89
7.4 Construcción Biodigestores	90
7.4.1 Biodigestores y gasómetro	90
7.5 Otros gastos	91
7.6 Mano de Obra	91
7.7 Resumen presupuesto Total.....	91
8 Bibliografía.....	92
8.1 Páginas web	92
8.2 Libros.....	93
8.3 Vídeos y enlaces de interés.....	93

Índice de figuras

Figura 1 Biodigestor de Campana Flotante en desuso situado en el RUPAP	9
Figura 2 Biodigestor tipo Chino en desuso situado en el RUPAP	9
Figura 3 Biodigestores en desuso proyecto años 90 situados en el RUPAP	10
Figura 4 Biodigestor tipo Batch.....	13
Figura 5 Modelo Chino	14
Figura 6 Modelo de Domo o Campana Flotante	15
Figura 7 Modelo horizontal de bajo costo	16
Figura 8 Biodigestores temperatura ambiente	18
Figura 9 Biodigestores en Camisa de Agua.....	19
Figura 10 Manómetro de tubo en U.....	20
<i>Figura 11 Manómetro de Columna Líquida del Laboratorio de Biomasa</i>	<i>21</i>
Figura 12 Unión agua y sustrato.....	22
Figura 13 Batiendo la mezcla sustrato-agua para homogenizar	23
Figura 14 Carga del biodigestor	23
Figura 15 Proceso biológico de la digestión anaerobia	25
Figura 16 Varios tipos de bacterias metanogénicas	26
Figura 17 Las tres fases de la fermentación anaeróbica de la biomasa	26
Figura 18 Dependencia de la constante de crecimiento de la temperatura.....	28
Figura 19 Diferentes usos de los productos derivados de la Digestión Anaerobia	36
Figura 20 Posibles usos del biogás	37
Figura 21 Calorímetro experimental	39
Figura 22 Analizador Orsat	42
Figura 23 Esquema calorímetro.....	49

Figura 24 Laboratorio Biomasa 17 Agosto 2010	57
Figura 25 Laboratorio Biomasa 20 Agosto 2010	58
Figura 26 Equipo de Trabajo. De izquierda a derecha: Jorge, Jean, Tere y Edgar	59
Figura 27 Resto equipo de trabajo. Frank.....	59
Figura 28 Biodigestores en construcción dentro del Laboratorio de Biomasa.....	60
Figura 29 Recogida del Sustrato de Vaca.....	61
Figura 30 En busca del sustrato.....	61
Figura 31 Carga biodigestor con estiércol de cerdo	62
Figura 32 Carga Biodigestores en Camisa de Agua.....	63
Figura 33 Mesa Laboratorio en fase de construcción.....	64
Figura 34 Trabajos de soldadura	65
Figura 35 Material de Laboratorio	66
Figura 36 Gasómetro en neumático de coche.....	67
Figura 37 Preparación prueba piloto Biogás	68
Figura 38 Prueba llama al quemar muestra biogás.....	68
Figura 39 Logo polo conmemorativo del PCI.....	69
Figura 40 Gasómetro vasos comunicantes	70
Figura 41 Gasómetro campana flotante.....	70
Figura 42 Acto Presentación PCI Laboratorio Biomasa	71
Figura 43 Placa conmemorativa inauguración oficial Laboratorio Biomasa	72
Figura 44 Parte del equipo de trabajo del PCI España-Nicaragua	72
Figura 45 Prueba oficial biogás Acto Apertura Laboratorio Biomasa	73
Figura 46 Orificio drenaje Biodigestor.....	76
Figura 47 Orificios de alimentación, biogás y manómetro	76
Figura 48 Drenaje del digestor	77



Figura 49 Conexiones superiores digestores batch.....	77
Figura 50 Imagen ampliada tomas superiores digestor Batch	78
Figura 51 Salida del Biol	78
Figura 52 Imagen ampliada salida biol.....	79
Figura 53 Laboratorio antes del acondicionamiento	82
Figura 54 Laboratorio después del acondicionamiento	83

Índice de Tablas

Tabla 1 Tiempos de retención en función de regiones características	27
Tabla 2 Tipos de fermentación y rangos de trabajo.....	28
Tabla 3 Valores de pH para la Producción del Biogás	29
Tabla 4 Producción de estiércol diario	31
Tabla 5 Parámetros del sustrato.....	32
Tabla 6 Obtención, Rendimiento, Producción y Relación de los diferentes sustratos ...	33
Tabla 7 Generación de Biogás.....	34
Tabla 8 Composición biogás	35
Tabla 9 Valores típicos biogás análisis base seca.....	35
Tabla 10 Equivalencias energéticas del biogás	36
Tabla 11 Valores promedio comunes	49
Tabla 12 Valores finales para biogás e isobutano	50
Tabla 13 Gastos acondicionamiento Laboratorio	87
Tabla 14 Gastos soportes biodigestores y mesa laboratorio.....	88
Tabla 15 Gastos material Laboratorio	89
Tabla 16 Gastos biodigestores y gasómetro	90
Tabla 17 Otros gastos	91
Tabla 18 Gastos mano de obra	91
Tabla 19 Resumen gastos PCI España - Nicaragua.....	91

Glosario

A continuación se muestran los acrónimos que se utilizan en este documento:

Acrónimo	Significado
PCI	Programa Cooperación Interuniversitaria
PFC	Proyecto Fin de Carrera
UC3M	Universidad Carlos III de Madrid.
UNI	Universidad Nacional de Ingeniería
RUPAP	Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios
PCI ó pci	Poder Calorífico Inferior
FTI	Facultad de Tecnología de la Industria
FTC	Facultad de Tecnología de la Construcción
FCYS	Facultad de Ciencias y Sistemas
FACA	Facultad de Ciencias Agraria
POA	Plan Operativo Anual

Equivalencias de Unidades

A continuación se adjuntan algunos valores de medidas equivalentes entre el Sistema Anglosajón de Medidas y el Sistema Internacional de Medidas.

1 galón = 3.785 litros

1 pulgada = 2,54 cm

1 psi = 6894,75 pascales

1 Introducción;Error! Marcador no definido.

1.1 Motivación

La motivación que ha propiciado la realización de este proyecto fin de carrera es un compendio de situaciones que juntas me han llevado a tomar la decisión de querer hacer un proyecto de cooperación en un país en vías de desarrollo.

Por un lado, a nivel profesional hacer un proyecto de estas características es un verdadero reto puesto que se mezclan varios factores de importancia que le dan relevancia. En primer lugar, he de decir que es un proyecto que no está relacionado con mi especialidad de la carrera, pero me llamaba bastante por estar relacionado con las Energías Renovables y quería demostrarme a mí mismo que los Ingenieros Industriales somos polivalentes y nos adaptamos a cualquier tipo de proyecto. Además, se une que la temática del proyecto estaba más orientada a algo de índole práctico, a hacer trabajo de campo ó ejecución de obra y no sólo se basaba en el plano teórico, ya que como dice el dicho: “El papel lo aguanta todo”. Además, este es mi segundo PFC tras haber realizado uno para finalizar la Ingeniería Técnica Industrial y necesitaba buscar alicientes y motivaciones para seguir aprendiendo y no hacer un proyecto parecido donde no sacara nada positivo. Luego, hacer el proyecto en Nicaragua, significaba un cambio radical con respecto a mi otro proyecto (más relacionado con la parte teórica), sería otro mundo literalmente hablando y una motivación extra, no sólo por la temática y el tipo de proyecto sino por el tener que enfrentarme a otro país, con su idiosincrasia particular, su forma de trabajar o la barrera del lenguaje entre otros (aunque sea de habla hispana debemos tener en cuenta cambian muchas palabras y significados).

Por otro lado, a nivel personal aunque ya he estado varias veces en el extranjero, nunca he podido hacer una estancia larga fuera de España, ya que no he podido realizar la beca Erasmus durante mis años de estudio y me parecía que el Proyecto Fin de Carrera era el último tren que podía coger, pero a la vez el más adecuado. Unido a esto, en mis últimos años de universitario he estado ligado a una asociación de estudiantes donde nos dedicamos a organizar eventos para estudiantes y al participar en la III Semana de la Solidaridad organizada por la Universidad Carlos III fue cuando

definitivamente me convencí de que quería hacer mi PFC en cooperación. No sólo sería positivo por vivir la experiencia de estar en otro país, acercarte a su cultura, la gente, las costumbres, forma de ver las cosas, sino que, además, tendría la satisfacción personal de haber aportado mi granito de arena en un proyecto de cooperación al desarrollo.

1.2 Objetivos antes de estar en Nicaragua

El objetivo principal de este proyecto, en teoría y sobre el papel, es la continuación del PCI que fue aprobado en la convocatoria de 2009 de Ayudas a Proyectos de Cooperación realizada por la UC3M y que se está desarrollando desde el año pasado sobre la construcción de un digestor anaerobio. De este modo, se supervisará la finalización de la construcción y se procederá a la puesta en marcha de este digestor anaerobio, para la eliminación de residuos de los mercados nicaragüenses (fundamentalmente residuos vegetales). También se procederá a la construcción y calibración de los sistemas de medida para el análisis del sustrato, un calorímetro y un equipo Orsat respectivamente. Este proyecto se realizará en colaboración con la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) de Nicaragua, ubicada en Managua, como contraparte de este PCI.

Este objetivo principal puede dividirse en:

1. Finalizar la construcción de una planta piloto consistente en un digestor anaerobio y correspondiente puesta en marcha, sistema de trituración de residuos para la alimentación y sistemas de análisis y control de la instalación
2. Estudio de las condiciones de funcionamiento de los digestores y análisis de muestras obtenidas.
3. Formación de técnicos nacionales “in situ”.

Con la consecución de los objetivos se espera:

1. Realización del reactor anaerobio de pequeña capacidad, puesta en marcha y supervisión del funcionamiento.
2. Monitorización y optimización de las condiciones de trabajo para la digestión anaerobia de residuos orgánicos provenientes de mercados.

3. Dotar de unas infraestructuras mínimas a la UNI para el desarrollo de una línea de investigación en digestión anaerobia en aras a su desarrollo local y posible implantación en un futuro.
4. Formación de técnicos nacionales “in situ” para el correcto uso de las instalaciones y futuro desarrollo de nuevas tecnologías en estas vías de investigación.

1.3 Objetivos después de llegar a Nicaragua: Reformulación

Tras mi llegada a Nicaragua y tomar contacto con los responsables en la UNI del PCI, fue cuando realmente se tuvo una visión real de la situación y el estado de avance en el que se encontraba el PCI. La situación con la que nos encontramos fue la siguiente:

1. No se había habilitado todavía un espacio donde estaría ubicado el Laboratorio de Biomasa
2. Los dos digestores de 55 galones (210 litros aproximadamente) que se habían construido habían tenido problemas de fugas. O bien, por alguna toma de los digestores que estuviera en mal estado, o bien por alguna manipulación indebida por algún alumno de la UNI al no estar los digestores encerrados, sino dentro de una parte del taller Automotriz donde no estaba controlado el acceso.

Después de conocer el estado real de la situación, esto nos sirvió para poder establecer un punto de referencia y a partir de ahí poder marcar las pautas de trabajo durante los siguientes 3 meses. Para así, poder establecer objetivos y hacer una planificación realista acorde con el tiempo que se tenía para trabajar.

De este modo, teniendo en cuenta las circunstancias, me reuní con los dos responsables del proyecto en la UNI, María Teresa Castillo Rayo y Edgar Somarriba Lezama y, en consenso, se **decide reformular el proyecto**. A continuación, se detallan los siguientes cambios en los objetivos establecidos anteriormente:

1. Agilizar lo más posible la adjudicación de un espacio para establecer el laboratorio y así poder trabajar en un sitio donde los biodigestores no

fuesen objeto de posibles manipulaciones indebidas, así como tener un espacio de trabajo donde poder hacer los ensayos de las muestras obtenidas.

2. Realizar 5 biodigestores de pequeño tamaño (25 galones, aproximadamente 95 litros) en lugar de 2 grandes de capacidad 210 litros aproximadamente. De estos 5 biodigestores, decidimos hacer 2 de ellos en “camisa de agua” para intentar controlar la temperatura de trabajo del biodigestor para así acelerar el proceso de creación del biogás (aprovechando los dos envases de 55 galones existentes) y bajar el tiempo de retención y al mismo tiempo, que el agua actuase como sello hidráulico.
3. Se elige el tipo de sustrato que se va a utilizar, para garantizar que se pueda obtener el mismo durante toda la estancia. Se decide usar: estiércol de vaca, estiércol de cerdo, los residuos del comedor del RUPAP (Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios) y los lodos del Mercado del Mayoreo. Además, se decide estudiar al menos uno de los sustratos a temperatura ambiente y con la camisa de agua.
4. Construir un calorímetro para obtener el poder calorífico del biogás y un gas referente. Construir un equipo Orsat para poder evaluar las muestras de biogás obtenido para determinar las concentraciones de CH_4 , CO_2 y O_2 producidas.
5. Formación y capacitación de personal nacional “in situ” para que aprendieran a hacer uso de las instalaciones y al mismo tiempo, motivar e incentivarlos para crear futuras líneas de investigación en este apartado de las Energías Renovables.

1.4 Esquema del documento

La memoria de este Proyecto Fin de Carrera comienza con este capítulo de introducción, donde se ha definido la motivación, el problema y los objetivos.

Posteriormente se pasa a un segundo capítulo donde se recogen la evolución de la tecnología, los antecedentes a este estudio, tipos de sustrato o parámetros de relevancia relacionados con la temática del proyecto de los que se ha hecho uso.

En un tercer capítulo se explicará cómo han sido hechos los cálculos de los biodigestores, así como un análisis de los ensayos hechos, comparativa de resultados y posibles ideas para futuros proyectos como continuación de este.

El cuarto capítulo, expone la cronología y desarrollo del proyecto, incluyendo las decisiones que se van tomando a medida del paso del tiempo y de los inconvenientes que se van dando.

El quinto capítulo, está dedicado a la explicación de la construcción de un biodigestor tipo batch explicado paso a paso y consejos constructivos.

En el capítulo sexto se expondrá el laboratorio de biomasa que se ha creado para trabajar en los biodigestores, explicando fases de adecuación, diseño del mobiliario y equipamiento del mismo.

El capítulo siete estará dedicado a detallar los gastos y mostrar el presupuesto del proyecto

Por último, la bibliografía se resume en el octavo capítulo.

2 Estado del Arte

2.1 Introducción

2.1.1 Un poco de historia. Comienzos

El interés científico en los gases producidos por la descomposición natural de la materia orgánica, fue divulgado por primera vez en el siglo XVII por Robert Boyle, que observó que había gas inflamable en el sedimento los lagos. Se sabe que el hombre conoce desde muy antiguo la existencia del biogás, pues este se produce en forma natural en los pantanos, de allí que se lo llama gas de los pantanos. En sitios como Argentina se encuentra en el delta del Paraná donde se perfora hasta llegar a alcanzarlo con una cañería obteniéndose el biogás acumulado por la naturaleza.

En 1808, Dalton, Henry y Davy producen gas metano (principal componente del biogás) en un laboratorio, Davy consigue determinar que el metano estaba presente en los gases producidos por el abono del estiércol del ganado. Se toma este acontecimiento como el inicio de la investigación en biogás. Desde esos días hasta la actualidad mucho se ha avanzado sobre el tema y actualmente se cuenta en instalaciones que van desde la pequeña escala doméstica hasta las aplicaciones agroindustriales. El primer digestor anaerobio fue construido por una colonia en Bombay, La India en 1859. En 1895 la tecnología fue desarrollada en Exeter, Inglaterra, donde un tanque séptico fue utilizado para generar el gas que fue utilizado para dar iluminación en la calle. También en Inglaterra, en 1904, se construye el primer tanque de doble finalidad para: sedimentación y tratamiento del lodo, fue instalado en Hampton. En 1907, en Alemania, fue publicada una patente sobre el Tanque de Imhoff, una forma temprana de digestor.

Con la investigación científica de la digestión anaerobia en alza y con reconocido prestigio académico, es en los años 30, cuando esta investigación condujo al descubrimiento de las bacterias anaerobias, los microorganismos que facilitaban el proceso de la digestión anaerobia. Una investigación adicional fue realizada para investigar las condiciones bajo las cuales las bacterias metanogénicas podían crecer y reproducirse. Este trabajo fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial donde en

Alemania y Francia hubo un aumento del uso de la digestión anaerobia para el tratamiento de los abonos.

2.1.2 China e India

La historia de la investigación y utilización del biogás en China cubre un periodo de más de 50 años. Las primeras plantas de biogás fueron instaladas en los años 40 del siglo XX por familias prósperas de la época. Luego, desde los años 70 en adelante, la investigación del biogás fue evolucionando de manera rápida y fue promocionada intensivamente por medio del gobierno chino. En las zonas rurales, han sido construidas más de 5 millones de plantas para uso doméstico y hoy en día, más de 20 millones de personas usan el biogás como combustible.

En la India, el desarrollo de pequeñas plantas de biogás en medios rurales comenzó en los años 50 del siglo XX. Pero no fue hasta los años 70 cuando gracias a una fuerte inversión del gobierno da un fuerte despegue. De este modo, hoy en día, existen más de un millón de plantas de biogás en la India.

La experiencia histórica en Alemania, China e India demuestra claramente, como el desarrollo de la tecnología del biogás en favorable en diferentes condiciones. En Alemania, la diseminación y expansión del biogás ganó terreno gracias a la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía tras los destrozos ocasionados por la época de la y la crisis de energía o, más tarde, con el cambio del precio de la electricidad. En la India y China fueron los fuertes programas de desarrollo y expansión los que ayudaron a que creciera en masa la tecnología del biogás.

2.1.3 Alemania promociona la tecnología del biogás en el Sur

A finales de los años 70, impulsado por Schumacher con el plan llamado “*Small is Beautiful*” (“Lo pequeño es bonito”), las tecnologías apropiadas entran en procesos de trabajo de desarrollo en el Sur. No alta tecnología de los países del hemisferio Norte, pero innovadora, aceptable, simple y tradicional, donde, se pensó que era el remedio para el desarrollo de la tecnología y acortar el vacío tecnológico entre los países industrializados y los países en vías de desarrollo. Después de esta época, llega el lanzamiento en 1980 por parte del organismo Alemán GTZ eligió la tecnología del

biogás como foco principal de sus actividades. Esta iniciativa obtuvo como resultado un esquema sectorial que ha ido definiendo el plan de apoyo y expansión al desarrollo de la tecnología del biogás en América Latina, Asia y África.

Los países industrializados, o no tenían la experiencia suficiente o no tenía la tecnología apropiada para aplicarlos en los países en vías de desarrollo. Raramente, esta experiencia fue identificada en India y China y fue transmitida por una transferencia de tecnología Sur-Norte-Sur. El término “tecnología apropiada” surge por el hecho de que esta tecnología fue adaptada a las respectivas condiciones locales durante la etapa de aprendizaje con los países en vías de desarrollo.

Un gran número de programas de expansión fueron gestionados por el organismo alemán de cooperación GTZ y lanzados en Bolivia, Colombia, Nicaragua, el Caribe (Belize y Jamaica), Tanzania, Kenia, Burundi, Marruecos y Tailandia. Inicialmente, el biogás y la tecnología anaeróbica se centró en las granjas de pequeña escala. En una fase más avanzada, las granjas más grandes del mismo modo que incrementaron los tratamientos de desechos, también se vieron involucradas en la tecnología del biogás. Estas actividades habían sido un resultado positivo de los efectos secundarios en los otros países pertenecientes al programa, en Alemania, Europa y la cooperación internacional al desarrollo. Como en otros campos de la tecnología apropiada (TA) promoción, protección medioambiental, provisión de energía y soporte al sector privado de empresas de desarrollo está creciendo, pues está comprobado que son elementos inseparables para el desarrollo sostenible de la tecnología.

2.1.4 Proyecto de biodigestores en Nicaragua

El biogás y su tecnología están presentes en Nicaragua desde mediados del siglo XX donde la corporación GTZ entre otros incluyó en su plan de diseminación de la tecnología del biogás. La información fehaciente sobre proyectos llevados a cabo es escasa, pero si se sabe que ha habido proyectos tanto públicos como privados que se han realizado y que funcionan hoy en día en diferentes zonas del país utilizando esta tecnología, desde pequeños biodigestores caseros de bajo coste a algunas industrias que ya los tienen implementados. Sin ir más lejos, en el RUPAP hubo un proyecto de biogás a principios de los años 90 con ayuda de la cooperación alemana, donde se construyeron

dos biodigestores, uno de campana flotante y otro tipo chino, pero poco después de que la cooperación cesase su apoyo al proyecto y por diferentes circunstancias, el proyecto se vino abajo por falta de continuidad y los biodigestores quedaron en desuso.



Figura 1 Biodigestor de Campana Flotante en desuso situado en el RUPAP



Figura 2 Biodigestor tipo Chino en desuso situado en el RUPAP



Figura 3 Biodigestores en desuso proyecto años 90 situados en el RUPAP

Hoy por hoy, la tecnología del biogás ya es algo conocida en Nicaragua, pero para el potencial que tiene este país tan agrícola está todavía en unos niveles de uso e implantación muy bajos.

2.2 Definición valores característicos

A continuación, se definirán una serie de términos familiarizados con los digestores anaerobios y la tecnología del biogás. Para facilitar el entendimiento de este documento haremos una breve descripción de cada uno de estos términos.

- **Tecnologías Apropriadas (TA):** Las tecnologías apropiadas pueden describirse como las que presentan un mesurado equilibrio entre sí: cualidades técnicas, viabilidad económica y capacidad de adaptarse al medio en el que han de emplearse.
- **Biogás:** El biogás es el gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico). El producto resultante está formado por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y otros gases en menor proporción.

- **Biodigestor:** Un biodigestor es un contenedor que produce biogás y biol (abono natural) a partir de material orgánico, principalmente excrementos (animales y humanos) y desechos vegetales. Se trata de un sistema sencillo y económico que recicla los residuos orgánicos convirtiéndolos en energía y fertilizantes para usos agrícolas, ideal para comunidades rurales y países en vías de desarrollo.
- **Tiempo de Residencia o Tiempo de Retención (T_R):** Es el lapso durante el cual el material de fermentación permanece en el biodigestor y es el tiempo necesario para la completa fermentación del material.
- **Producción específica de Gas/día (G_d):** ira en dependencia del tiempo de retención y del material de fermentación.
- **Volumen del Digestor (V_D):** Se trata del volumen total que tiene el recipiente donde se va a desarrollar la digestión anaerobia. El tamaño del biodigestor viene definido por el tiempo de retención (T_R) y por la cantidad diaria de cieno de fermentación (C_f) o carga de biomasa. Este volumen se divide en dos: volumen gaseoso y volumen líquido. Normalmente se mide en m^3 .
- **Masa Seca ó Sólidos Totales (MS ó ST):** El porcentaje de agua varía en cada material de fermentación natural, por esa razón, en trabajos de investigación más exactos se opera con la parte sólida o masa seca del material de fermentación.
- **Masa Orgánica Seca ó Sólidos Volátiles Totales (MOS ó SVT):** Para el proceso de fermentación son importantes sólo los componentes orgánicos o volátiles del material de fermentación. Por eso, se trabaja sólo con la parte orgánica de la masa seca.
- **Carga de Fermentación (C_f):** Cantidad de estiércol que se deposita en el biodigestor diariamente, en caso de ser un sistema continuo, o con la que se carga para cada varios días cuando se llena el biodigestor por primera vez o para ir completando el espacio liberado por la salida del biogás ya fermentado.

- **Carga del biodigestor:** Esta indica con cuánto material orgánico es alimentado diariamente o cuánto material debe ser fermentado al día. La carga del digestor se calcula en kilogramos de masa orgánica por metro cúbico del digestor por día (kg MOS/m^3 diario). Largos tiempos de retención producen una menor carga del biodigestor. Para las plantas de biogás sencillas, cargas de $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ ya son bastante altas. Plantas grandes con control de temperatura y agitación mecánica se pueden cargar con unos $5 \text{ m}^3/\text{d}$. Si la carga del biodigestor es demasiado alta, baja el valor del pH. En estos casos, la planta se queda estancada en la fase ácida, porque hay más material de fermentación que bacterias de metano.
- **Producción específica de biogás:** Se indica en relación con la cantidad de cieno de fermentación, con la masa seca o con la masa orgánica seca. En la práctica ella indica la producción de gas que se obtiene de un determinado material de fermentación durante un determinado tiempo de retención con determinada temperatura en el biodigestor.
- **Grado de fermentación (en %):** Este indica cuánto gas se obtiene en comparación con la producción total de gas. La diferencia con 100% indica qué cantidad de material de fermentación todavía no ha sido fermentado. En plantas de biogás sencillas, el grado de fermentación alcanza alrededor del 50%. Esto significa que la mitad del material de fermentación queda sin aprovechar.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es importante en la técnica de aguas residuales, ya que indica el grado de contaminación del agua. La DBO mide la cantidad de oxígeno que es consumida por las bacterias durante el tratamiento biológico de aguas residuales.

2.3 Tipos de Biodigestores

2.3.1 Biodigestores discontinuos

Los biodigestores discontinuos o por lotes son contenedores cerrados que una vez cargados no permiten extraer o añadir más sustratos hasta que finalice el proceso completo de biodegradación y producción de biogás. En otras palabras, el proceso finaliza cuando no se produce más biogás (figura 4).

Estos tipo de digestores admiten mayor carga de materiales poco diluidos, por lo que **el requerimiento de agua es menor** que en los sistemas continuos. Otro aspecto a favor es que no son afectados por presencia de material pesado como tierra o arena.

Al principio y al final del proceso la producción de biogás es marcadamente menor; Lo cual se debe a la carencia de condiciones óptimas para los microorganismos anaeróbicos al inicio y posteriormente al agotamiento de de los nutrientes para los mismos.

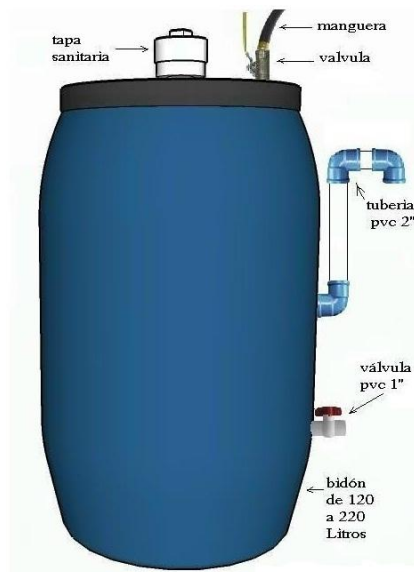


Figura 4 Biodigestor tipo Batch

2.3.2 Biodigestores Semi-continuos

Estos biodigestores son alimentados **diariamente** con una carga relativamente pequeña en comparación al contenido total; Ésta se deposita en la cámara de carga, e igualmente se debe extraer de la cámara de descarga un volumen igual del efluente

líquido para así mantener el volumen constante. **Generalmente producen biogás casi permanentemente**, gracias al suministro constante de nuevos nutrientes para las comunidades de bacterias.

Una limitante importante es la disponibilidad de agua, debido a que la carga debe ser una mezcla de una parte del material orgánico y cuatro partes de agua (proporción 1:4).

2.3.3 Biodigestores de mezcla completa

La característica que define a este tipo de biodigestores es que la carga añadida periódicamente se mezcla casi en su totalidad con el contenido ya presente en cámara de digestión. Como resultado, parte del material sin biodegradar sale en el efluente, lo cual evita que se pueda garantizar la eliminación total de agentes causantes de enfermedades en plantas y animales así como de semillas de plantas arvenses (malezas).

2.3.3.1 Modelo Chino

Se originó en China y consiste en una estructura cerrada con cámaras de carga y descarga que puede ser construida de concreto armado o ladrillos. Tienen una **larga vida útil** (mayor a 15 años) con un adecuado mantenimiento. Sin embargo, el relativo *alto* costo que representa la construcción de este modelo hace que no se haya popularizado en países latinoamericanos tanto como otros diseños.

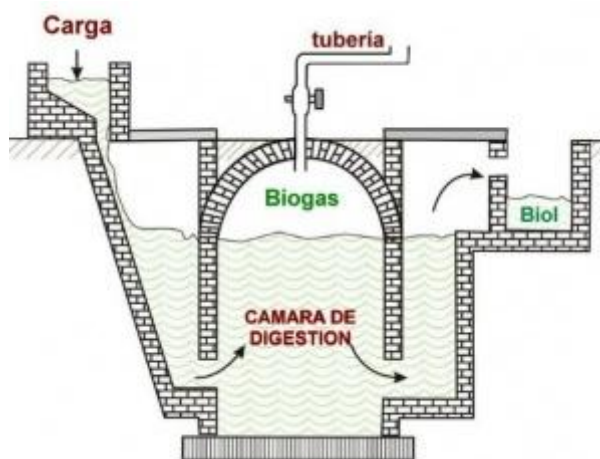


Figura 5 Modelo Chino

El digestor almacena solo pequeño volumen del gas generado en el interior, por lo que requiere un contenedor diferente construido para tal fin (gasómetro).

2.3.3.2 Modelo Indio

También llamado de **domo flotante**, en su parte superior presenta una campana o domo que se mantiene flotando en el líquido a causa del biogás que retiene en su interior. El domo puede ser de metal o preferiblemente de un material resistente a la corrosión como los plásticos reforzados. Esta campana sube y baja dependiendo del volumen de gas que contiene y por esto requiere una varilla guía central o rieles laterales que eviten el rozamiento contra las paredes de la estructura.

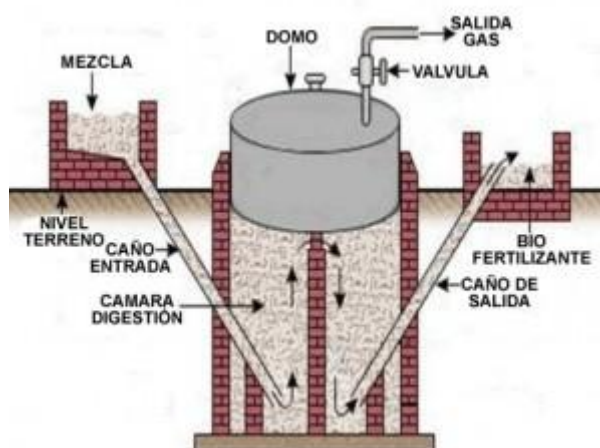


Figura 6 Modelo de Domo o Campana Flotante

Tienen la ventaja que no necesita un contenedor externo para el almacenar el gas generado. Este se mantiene a una presión relativamente constante al interior del domo, lo que es muy ventajoso.

Una variación a este modelo lo constituyen los biodigestores que presentan una película de polietileno flexible en la parte superior en sustitución del domo flotante. Haciéndolos más económicos y accesibles socialmente.

2.3.3.3 Biodigestores de flujo pistón

Son aquellos en los cuales la cámara de digestión es **alargada** y por lo tanto la degradación de los residuos transcurre a medida que transitan a lo largo del digestor. En esta categoría se encuentran los digestores familiares de bajo costo.

Modelo Horizontal

Es básicamente un digestor tubular horizontal en cuyos extremos se sitúan las cámaras de carga y descarga del sistema. Su configuración alargada impide que la carga

líquida inicial y el efluente se mezclen; Esto lo hace útil en el aprovechamiento de residuos que requieran un tratamiento prolongado, tales como excretas humanas y ciertos desperdicios de sacrificio de animales.



Figura 7 Modelo horizontal de bajo costo

Los **biodigestores familiares de bajo costo**, populares en países en vías de desarrollo, son fáciles de implementar ya que se fabrican con grandes bolsas de polietileno tubular. Suelen situarse dentro de una especie de trinchera o zanja y su periodo de vida útil son unos cinco años.

Además de los modelos comunes descritos en este documento, existen otros con variaciones de todo tipo; variaciones en forma, tamaño, continuidad del afluente y materiales de construcción.

2.3.4 Biodigestores de Segunda y Tercera Generación

El digestor de segunda generación opera básicamente en dos niveles. En la parte baja del mismo se construye un túnel o laberinto, que sirve para retener temporalmente todos los materiales que tienden a flotar; con las divisiones internas se divide el laberinto en una serie de cámaras independientes pero comunicadas entre sí de forma continua. Por medio de planos inclinados y ranuras delgadas en las placas de ferro-

cemento que conforman el techo del laberinto, se permite el paso del gas y del material ya hidrolizado y degradado

Los materiales lentamente digeribles, que completan su ciclo de degradación anaeróbica en más de 100 días, pueden hacerlo al tiempo con excrementos que requieren mucho menos tiempo, entre 15 y 20 días

El digestor de tercera generación es la mezcla de varios digestores en una unidad. El laberinto es típico del sistema de Tapón o Bolsa, con longitudes efectivas de 20 a 30 metros, es el sistema más sencillo y práctico de todos los digestores de tipo convencional; las diferentes cámaras independientes (6 o más según el diseño) brindan las ventajas de los digestores de carga única; al final del recorrido y en la parte superior, se encuentra la última recámara, grande, que equivale al digestor tipo Hindú, con su campana flotante, carga por la parte inferior y salida del efluente por rebose en la superior. Este tipo de digestor en especial, ofrece una doble ventaja económica, ya que por un lado se construye una sola unidad del tamaño adecuado a las necesidades en lugar de varias independientes más pequeñas; y por otro lado se elimina el costo de mano de obra necesaria para estar cargando y descargando periódicamente las unidades de carga única.

2.4 Biodigestor Elegido: Batch

El biodigestor que fue seleccionado al final para implementarse en el laboratorio de biomasa que se estaba poniendo en marcha fue el tipo Batch, pero con una serie de modificaciones que nos llevan a denominarlo **Biodigestor Batch Híbrido**. Este tipo de biodigestor se trata básicamente de un biodigestor discontinuo, ya que no se le está suministrando carga de fermentación a diario, pero está preparado para poder ser alimentado mientras está en funcionamiento. Como se describe en los objetivos, se ha decidido hacer biodigestores en dos ambientes: 3 biodigestores a temperatura ambiente y 2 biodigestores en camisa de agua.

El Biodigestor Batch Híbrido a "Temperatura Ambiente" se le ha practicado las siguientes modificaciones:

- Se le ha realizado una toma de drenaje (2") para poder evacuar los lodos que se creen en el fondo del digestor.
- Se le ha habilitado una toma de alimentación para poder ir recargando el digestor a medida de que se evacúe el biogás y el biol de la primera carga. Esta carga no será diaria, pero si periódica.
- Se ha realizado una toma de drenaje del biol (1/2") a media altura del digestor. Concretamente a 1/3 de 1/3 del recipiente por encima de 1/3 del depósito total (Es decir, si se divide el recipiente del biodigestor en 9 partes, estaría situada la toma del biol a 4/9 de la altura total del depósito).
- Se ha realizado una toma de salida del biogás (1/2") con una toma de recirculación del biogás para reactivar el sustrato en fermentación.
- Se ha realizado una toma para situar unos manómetros para medir la presión a la que está sometida el biogás dentro del digestor.



Figura 8 Biodigestores temperatura ambiente

Respecto al Biodigestor Batch Híbrido en "Camisa de Agua" se ha construido igual que el caso anterior, pero con una serie de variantes:

- Se ha eliminado la toma de drenaje (2") para poder evacuar los lodos que se creen en el fondo del digestor por problemas de filtraciones y falta de tiempo.
- La toma de drenaje del biol (1/2"), se practica a la misma altura, pero en este caso sale perpendicular al depósito.
- En la toma para el manómetro, se ha implantado una toma reductora de 3/8" para instalar un manómetro de columna líquida o bien usar esa toma para llenar los gasómetros de neumático de coche que aparecen en la figura 9.



Figura 9 Biodigestores en Camisa de Agua

2.4.1 Manómetro de Columna de Líquido

La forma más fácil para medir la diferencia entre las presiones de dos fluidos es utilizar una doble columna líquida. En este caso, el manómetro de columna de líquido es el patrón base para la medición de pequeñas diferencias de presión.

Las dos variedades principales son el manómetro de tubo de vidrio, para la simple indicación de la diferencia de las presiones, y el manómetro de mercurio con recipiente metálico, utilizado para regular o registrar una diferencia de presión o una corriente de un líquido.

Los tres tipos básicos de manómetro de tubo de vidrio son el de tubo en U, los de tintero y los de tubo inclinado, que pueden medir el vacío o la presión manométrica dejando una rama abierta a la atmósfera.

Manómetro de tubo en U: Si cada rama del manómetro se conecta a distintas fuentes de presión, el nivel del líquido aumentará en la rama a menor presión y disminuirá en la otra. La diferencia entre los niveles es función de las presiones aplicadas y del peso específico del líquido del instrumento. El área de la sección de los tubos no influye en la diferencia de niveles. Normalmente se fija entre las dos ramas una escala graduada para facilitar las medidas.

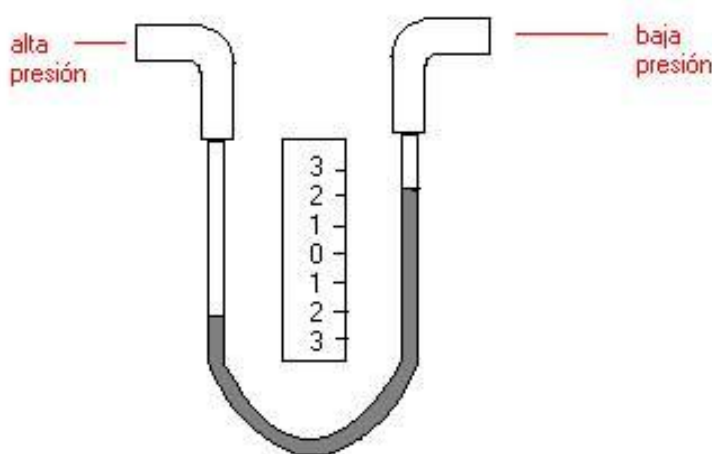


Figura 10 Manómetro de tubo en U



Figura 11 Manómetro de Columna Líquida del Laboratorio de Biomasa

Normalmente, los tubos en U de los micro-manómetros se hacen con tubos en U de vidrio calibrado de precisión, un flotador metálico en una de las ramas y un carrete de inducción para señalar la posición del flotador. Un indicador electrónico puede señalar cambios de presión hasta de 0.01 mm de columna de agua dándonos una gran precisión.

2.4.2 Carga del Biodigestor Batch

En este apartado, se describe de manera concisa los pasos que se deben seguir para cargar un biodigestor tipo batch para ponerlo en funcionamiento y que empiece a producir biogás. A continuación, pasamos a desglosar los pasos a seguir:

1. Se calcula la carga de fermentación (C_f) que va a llevar el biodigestor, siempre en función de las dimensiones del biodigestor y teniendo en cuenta el tipo de sustrato que va a llevar, ya que varían las proporciones entre sustrato y agua (1:1, 1:3, 1:4, etc.). En nuestro caso, al ser tipo batch sólo se calcula la carga de partida que va a llevar y la proporción utilizada para el tipo de sustratos que se utiliza. Para nuestro caso, que se

utiliza estiércol de cerdo y estiércol de vaca la proporción agua-excreta es de 1:1.

2. Se debe tener en cuenta que, de la capacidad total del digestor: 1/3 irá dedicado al espacio donde se originará el biogás y donde se irá almacenando hasta que se deposite en un gasómetro. Los 2/3 restantes serán ocupados por la carga inicial del digestor (mezcla de sustrato y agua).
3. Una vez calculada la carga de fermentación (C_f) que se va a introducir en el biodigestor, se procede a pesar el sustrato en una báscula.
4. De forma paralela, se pone la misma cantidad de agua a calentar (lo ideal es que el agua se tibia para introducirla en el digestor, en torno a los 30-35 °C).
5. Una vez calentada el agua, se debe unir el sustrato y el agua tibia en un mismo recipiente (cubo o barril) para homogeneizar la mezcla e intentar eliminar la mayor cantidad de grumos y trozos grandes de sustrato.



Figura 12 Unión agua y sustrato



Figura 13 Batiendo la mezcla sustrato-agua para homogenizar

6. Se carga del biodigestor por medio del tubo de alimentación utilizando un embudo cónico de 2" (a ser posible) con la mezcla que se ha homogeneizado previamente.



Figura 14 Carga del biodigestor

7. Una vez finalizada la carga del biodigestor, se debe higienizar toda la zona para limpiar la mezcla que haya quedado fuera del depósito, así como toda la indumentaria y equipos que se han utilizado durante el proceso.

8. Por último, se debe anotar la de fecha y hora de la carga del equipo para llevar el control, monitorización y mantenimiento del experimento.

2.4.3 Mantenimiento del Biodigestor

Una vez que se haya hecho la puesta en marcha del biodigestor, se deben seguir una serie de pautas de mantenimiento:

1. Se debe purgar el biodigestor a la semana de haber sido puesto en marcha para expulsar el oxígeno que quedó encerrado dentro del digestor al hacer la puesta en marcha del equipo.
2. Esperar el tiempo de retención fijado para empezar a trasvasar el biogás a un gasómetro para hacer las pruebas pertinentes que se quieran realizar o ya directamente canalizarlo a una cocinilla, lámpara de gas, etc.
3. En caso de no tener agitador, agitar periódicamente de forma manual ya que el sustrato tiende a formar una capa dura que no deja que pase el biogás.
4. Analizar pH de la muestra periódicamente para verificar que se está dentro de los rangos óptimos de pH y que así, la muestra está trabajando correctamente.
5. Controlar temperatura del sustrato para analizar la posible repercusión de la misma durante fase de digestión anaerobia ya que puede influir en el tiempo de residencia o incluso llegar a parar el proceso de digestión anaerobia.

2.5 Proceso Digestión Anaerobia

El estiércol fresco contiene bacterias que continúan digiriéndolo y producen metano, dióxido de carbono y otros gases. Si esta digestión se hace en ausencia de aire (digestión anaerobia) se produce biogás, que es uno de los principales intereses de un biodigestor. Realmente hay una producción en cadena de diferentes tipos de bacterias. Unas inicialmente producen una hidrólisis del estiércol generando ácidos orgánicos. Otro tipo de bacterias digieren estos ácidos orgánicos a través de una deshidrogenación

y acetogénesis dando como resultado ácido acético e hidrógeno. Y finalmente otras bacterias, llamadas metanogénicas, digieren el hidrógeno y el ácido acético para transformarlo en metano, que es el gas más importante del biogás y el que permite la combustión.

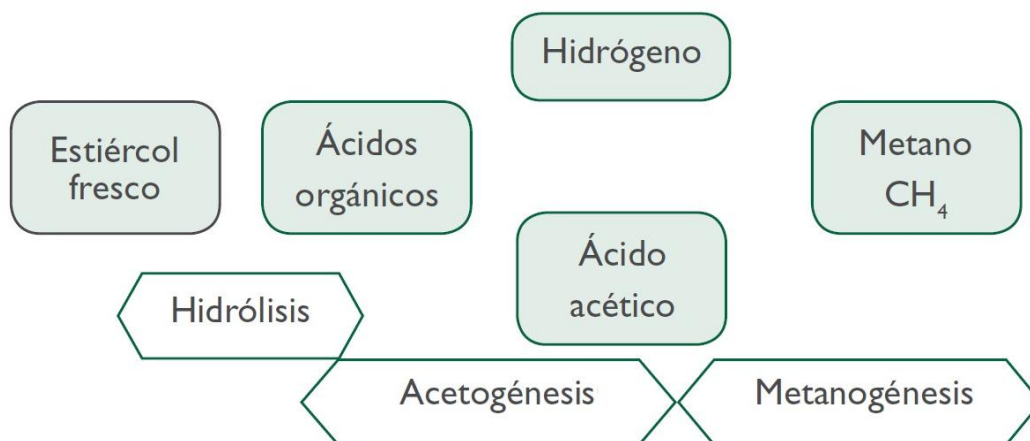


Figura 15 Proceso biológico de la digestión anaerobia

Entrando un poco más en el proceso químico de la digestión anaerobia, el proceso de fermentación se compone de tres fases principales como se puede apreciar en la figura 17:

Primera fase: Hidrólisis

Las bacterias fermentativas o acidogénicas hidrolizan los polímeros (largas cadenas de moléculas orgánicas) y las convierten a través de la fermentación en ácidos orgánicos solubles.

Segunda fase: Acidificación

Las bacterias acetogénicas causan una metabolización de los complicados ácidos orgánicos en acetatos (CH_3COOH), dihidrógenos (H_2) y carbodióxidos (CO_2).

Tercera fase: Metanización

A partir de las proteínas, hidratos de carbono y grasa, los aminoácidos, alcoholes y ácidos grasos que se formaron en las fases anteriores, en la última fase se forma el metano, bióxido de carbono y amoníaco.

Durante el desarrollo del proceso, el material de fermentación se vuelve más líquido. Cuanto mejor es el paso de una fase a la otra, más corto es el proceso de fermentación.

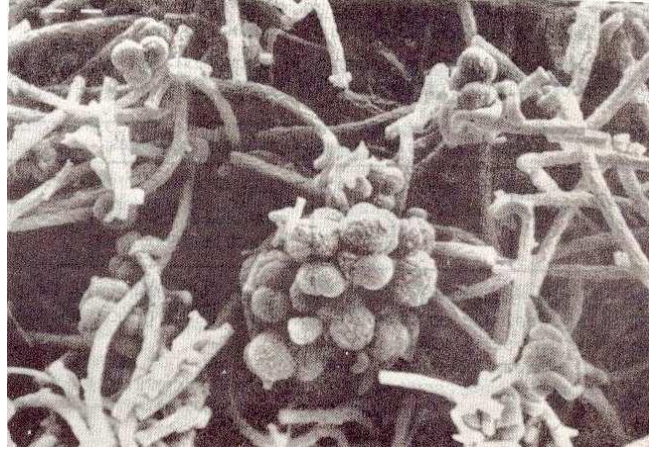


Figura 16 Varios tipos de bacterias metanogénicas

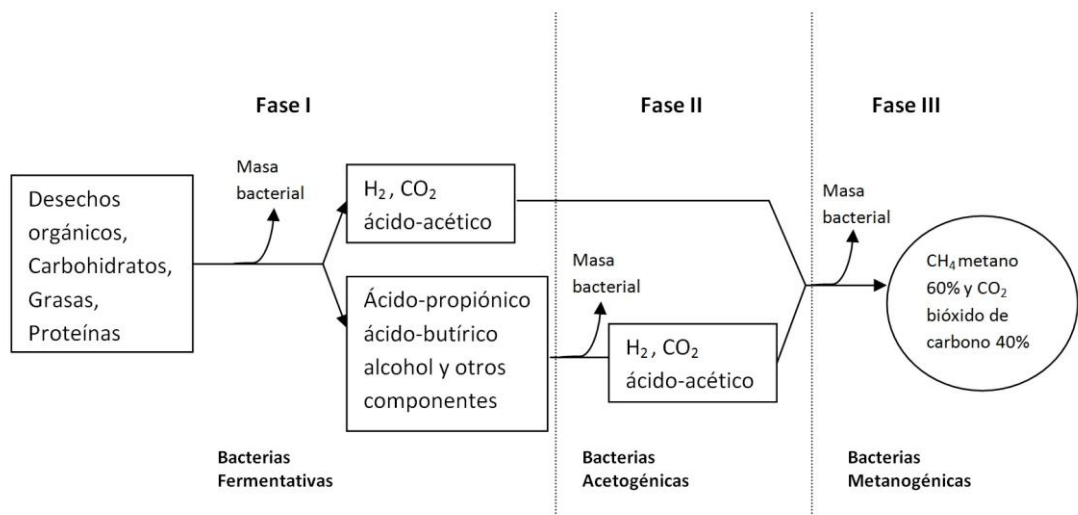


Figura 17 Las tres fases de la fermentación anaeróbica de la biomasa

2.5.1 Temperatura y Tiempo de Residencia

En el proceso de digestión anaerobia son las bacterias metanogénicas las que producen, en la parte final del proceso, metano. Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima. Existen poblaciones metanogénicas que tienen su mayor rendimiento a 70 °C de temperatura, pero para ello habría que calentar el lodo interior del biodigestor.

Hay otras poblaciones que tienen su rango óptimo de trabajo de 30 a 35 °C. Estas temperaturas se pueden alcanzar en zonas tropicales de manera natural. La actividad de las bacterias desciende si estamos por encima o por debajo del rango de temperaturas óptimas de trabajo.

En biodigestores sin sistema de calefacción se depende de la temperatura ambiente que en muchas regiones es inferior al rango de temperaturas óptimas. A menores temperaturas se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta. A temperaturas inferiores a 5°C se puede decir que las bacterias quedan ‘dormidas’ y ya no producen biogás.

Por ello es necesario estimar un tiempo de retención según la temperatura a la que se trabaje. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor. Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás.

Región característica	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Trabajo (°C)	Altura sobre el nivel del mar (m)	Tiempo de retención (días)
Altiplano	-12 a 20	6-10 (con invernadero)	2900 - 4500	60-75
Valle	5 a 30	15-20	1800 - 2900	30-40
Trópico	13 a 38	25-30	0 - 1800	20-25

Tabla 1 Tiempos de retención en función de regiones características

Ahora otra posible clasificación sería tener en cuenta la temperatura de trabajo que haya en el digestor, se diferencia entre:

- **Fermentación Psicrofílica:** se produce entre los 10-20 °C y el tiempo de retención es superior a los 100 días.
- **Fermentación Mesófilica:** se produce entre los 20-35 °C y el tiempo de retención es superior a los 20 días (aproximadamente 30-40 días).

- **Fermentación Termofílica:** se produce entre los 50-60 °C y el tiempo de retención es superior a los 8 días. Este tipo de fermentación no es apropiado para las plantas sencillas.

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de Fermentación
Psicrofílica	4-10 °C	15-18°C	25-30°C	Arriba de 100 días
Mesofílica	15-20 °C	28-33°C	35-45°C	30-60 días
Termofílica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Tabla 2 Tipos de fermentación y rangos de trabajo

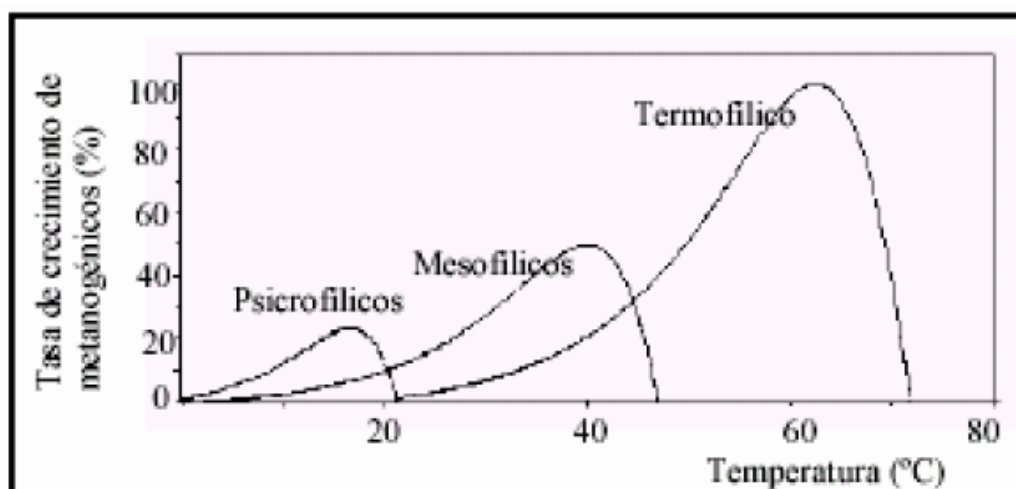


Figura 18 Dependencia de la constante de crecimiento de la temperatura

2.5.2 La relación C/N

Todos los materiales de fermentación están compuestos en su mayor parte por carbono (C) y contienen nitrógeno (N). La relación C/N influye sobre la producción de gas. Una relación C/N de 20:1 hasta 30:1 es ideal. Mezclas de materiales de fermentación con alto contenido de nitrógeno (por ejemplo estiércol de gallina) con material de fermentación con alto contenido de carbono (por ejemplo tamo de arroz) dan una elevada producción de gas.

2.5.3 El pH

El pH en el digestor es la función de la concentración de CO₂ en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima.

Las bacterias responsables del mecanismo de producción de biogás son altamente sensibles a cambios en el pH, oscilando de 6-8, teniendo como óptimo un pH de 7-7.2.

Valores de pH para la Producción del Biogás		
pH	7-7.2	Óptimo
pH	6.2	Retarda la acidificación
pH	7.6	Retarda la amonización

Tabla 3 Valores de pH para la Producción del Biogás

El pH del cieno de fermentación indica si el proceso de fermentación transcurre sin estorbos. El pH debe tener un valor alrededor de 7. Esto significa que la carga de fermentación no debe ser ni alcalina, ni ácida.

Luego, para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6 ni subir de 8. El valor el pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas.

El pH es una de las variables utilizadas en el diagnóstico de los sistemas anaerobios (aunque no se considera una buena variable de control por ser demasiado lenta) ya que muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Un ejemplo de ello, son las situaciones de acidificación de un reactor anaerobio provocadas por desequilibrios en la producción y consumo de ácidos grasos volátiles. La acumulación de éstos provoca un descenso en el pH que será más o menos acusada en función de la alcalinidad del medio.

Por otra parte, el pH afecta a los diferentes equilibrios químicos existentes en el medio, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Este es el caso de los equilibrios ácido-base del amoníaco y del ácido acético. Al aumentar el pH se favorece la formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano y a pH bajos se genera mayoritariamente la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato.

La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del medio. En el rango de pH del proceso de digestión anaerobia, el principal equilibrio que controla la alcalinidad es el del dióxido de carbono/bicarbonato. Estudios previos han demostrado que valores de la alcalinidad del bicarbonato por encima de 2500 mg/l, aseguran un buen control del pH y una adecuada estabilidad del sistema.

2.6 Sustratos para obtener biogás

Los residuos agropecuarios son una fuente ideal para el uso en plantas de obtención de biogás, sobre todo los residuos de ganadería. Por otro lado, alrededor de un tercio de los residuos municipales y una parte importante de los residuos industriales contienen materia orgánica. Gran cantidad de estos residuos se pueden aprovechar en las plantas de digestión anaerobia.

El sustrato es el material de partida en la producción de biogás. En principio, todos los materiales orgánicos pueden fermentar o ser digeridos. Sin embargo, sólo algunos pueden ser utilizados como sustratos en plantas de producción sencillas. Excremento y orina de vacas, cerdos y aves de corral son algunos ejemplos. A veces, también pueden usarse los desperdicios de las plantas de producción de alimentos, pero en estos casos hay que ser precavido y seleccionar bien la materia orgánica para no poner cítricos que acidifiquen la muestra y pueda dar problemas durante la digestión anaerobia porque el pH se vea alterado. Cuando se llena una planta de biogás, el excremento sólido debe diluirse con aproximadamente la misma cantidad de líquido, en lo posible orina. La máxima producción de gas que se puede conseguir a partir de una cantidad dada de materia prima depende del sustrato que se utilice.

A continuación, se citan varias tablas que indican de manera orientativa las cantidades de estiércol obtenido en función del tipo de sustrato utilizado, porcentajes de líquido en los diferentes sustratos, eficiencia en la producción de biogás, etc. Mediante estas tablas se intenta mostrar el mayor número posible de datos representativos de los diferentes tipos de sustratos.

Ganado	Kg de estiércol fresco producido por cada 100 kg de peso del animal
Cerdo	4
Bovino	8
Caprino	4
Conejos	3
Equino	7
Humano adulto	0,4 kg por adulto
Humano niño	0,2 kg por niño

Tabla 4 Producción de estiércol diario

Por otro lado, también se debe tener en cuenta que cualquier sustrato tiene como componentes:

1. La humedad
2. Sustancia seca: se puede dividir a su vez en dos: sustancia inorgánica seca (TS) o sustancia orgánica seca (oTS)

De estos elementos solo la sustancia orgánica seca es la que se convierte en biogás y que en adelante denominaremos “oTS”. La presente tabla indica cifras dentro del cual se mueven los valores del sustrato y esto básicamente debido a la alimentación del animal.

Leyenda por columnas: 1= Tipo del sustrato; 2=TS; 3= oTS; 4= Relación carbono/nitrógeno; 5= generación de biogas m³/kg oTS

Sustrato	TS (%)	oTS (% de TS)	C/N	Generación biogás m ³ /kg oTS
Guano de vacuno	7 - 10	77 - 85	10 - 20	0,18 - 0,4
Guano de cerdo	5 - 7	77 - 78	8 - 15	0,3 - 0,52
Guano de gallina	18 - 32	75 - 83	7 - 10	0,33 - 0,65
Guano de ovino/cabra	25 - 35	72	12 - 25	0,16 - 0,42
Guano de caballo	28		18 - 25	0,2 - 0,35
Hojas de remolacha	16	78,5	14 - 18	0,5 - 0,73
Planta de papas	25	79	17 - 25	0,55 - 0,7
Lodos de aguas servidas	65 - 80	10	-	0,31 - 0,65
Cáscaras de manzanas	2 - 3	95	6 - 7	0,45 - 0,65
Cáscaras de papas	12 - 15	90	13 - 19	0,4 - 0,7
Cáscara de trigo	6 - 8	87 - 90	10 - 11	0,6 - 0,8
Restos de verduras	10 - 20	76	15	0,5 - 0,62
Restos de frutas	45	93	50	0,5 - 0,62
Restos de comida	9 - 18	90 - 95	15 - 20	0,6 - 0,81
Basuras orgánicas	60 - 75	30 - 70	40 - 80	0,29 - 0,8
Lodos flotantes	5 - 24	83 - 98	-	0,7 - 1,0
Contenido estomacal (cerdos)	12 - 15	80 - 84	17 - 21	0,3 - 0,45
Contenido rumina Vacunos	11 - 19	80 - 88	17.21	0,4 - 0,57
Sebos	35 - 70	96	-	0,8 - 1,1
Oleaginosas y tortas	88	93	50	0,5 - 0,76

Tabla 5 Parámetros del sustrato

En esta tabla se puede analizar los diferentes valores orientativos: la cantidad de excreta por día, los rendimientos obtenidos de biogás, producción diaria y la relación excreta-agua en función del sustrato utilizado.

Especie Animal	Tamaño	Cantidad de excreta por día (kg)	Rendimiento de biogás (m3/kg excreta)	Producción de biogás (m3/animal día)	Relación excreta:agua
Vacuno	Grande	15	0,04	0,6	1:1
	Mediano	10	0,04	0,4	
	Pequeño	8	0,04	0,32	
	Ternero	4	0,04	0,16	
Búfalo	Grande	20	0,04	0,8	1:1
	Mediano	15	0,04	0,6	
	Pequeño	10	0,04	0,4	
	Ternero	5	0,04	0,2	
Cerdo	Grande	2	0,07	0,14	1:1 a 1:3
	Mediano	1,5	0,07	0,1	
	Pequeño	1	0,07	0,07	
Avícola	Grande	0,15	0,06	0,009	1:3
	Mediano	0,1	0,06	0,006	
	Pequeño	0,05	0,06	0,003	
Ovino	Grande	5	0,05	0,25	1:2 a 2:3
	Mediano	2	0,05	0,1	
	Pequeño	1	0,05	0,05	
Pato		0,15	0,05	0,008	1:2 a 2:3
Paloma		0,05	0,05	0,003	2:3 a 1:3
Caballo		15	0,04	0,6	1:2 a 2:3
Camello		20	0,03	0,6	1:2 a 2:3
Elefante		40	0,02	0,8	1:2 a 2:3
Humanos	Adulto	0,4	0,07	0,028	1:2 a 2:3
	Niño	0,2	0,07	0,014	

Tabla 6 Obtención, Rendimiento, Producción y Relación de los diferentes sustratos

En esta tabla, se muestra los rendimientos medios en producción de biogás en función del sustrato utilizado.

Sustrato	Generación de Gas	Promedio
	(L/Kg Biomasa seca)	(L/Kg Biomasa seca)
Excreta de Porcino	340 - 550	450
Excreta de vacuno	150 - 350	250
Excreta de Aves	310 - 620	460
Guano de caballo	200 - 350	250
Guano de oveja	100 - 310	200
Guano de establo	175 - 320	225
Paja de cereales	180 - 320	250
Paja de maíz	350 - 480	410
Paja de arroz	170 - 280	220
Gras fresco	280 - 550	410
Gras de elefante	330 - 560	415
Bagazo	140 - 190	160
Desperdicios de verduras	300 - 400	350
Jacintos	300 - 350	325
Algas	380 - 550	460
Lodos de aguas servidas	310 - 640	450

Tabla 7 Generación de Biogás

2.6.1 Usos del biogás

Al usar biodigestores anaerobios se va a obtener 3 productos derivados del proceso de la digestión anaerobia: biogás, efluente líquido o biol y lodo.

Biogás

Así como cualquier gas puro las propiedades características del biogás dependen de la presión y la temperatura. El valor calorífico del biogás es de unos 6 KWh/m³ que corresponde aproximadamente a la mitad de un litro de combustible diesel. El valor calorífico neto depende de la eficiencia de los quemadores o de su aplicación. La utilización de biogás en equipos comerciales requiere de adaptaciones sencillas para quemarlo eficientemente.

Una vez finalizado el proceso de la digestión anaerobia, este suele ser la composición típica del biogás obtenido:

Materia	%
Metano (CH ₄)	50-75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25-50
Nitrógeno (N ₂)	0-10
Hidrógeno (H ₂)	0-1
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	0-3
Oxígeno (O ₂)	0-2

Tabla 8 Composición biogás

Efluente líquido o Biol

Este es el segundo producto derivado de la digestión anaerobia. Una vez finalizado el proceso, el biol es un afluente inodoro con excelentes propiedades y que se suele emplear para abonar las tierras. Inicialmente se ha considerado un producto secundario, pero actualmente se está considerando de la misma importancia, o mayor, que el biogás ya que provee a las familias campesinas de un fertilizante natural que mejora mucho el rendimiento de las cosechas.

Lodo

Este es el tercer derivado de la digestión anaerobia. Luego, además de generar biogás combustible y biol, la fermentación anaeróbica de la materia orgánica produce un lodo o residuo de excelentes propiedades fertilizantes, su composición varía de acuerdo al desecho utilizado, y en promedio un análisis en base seca es el siguiente:

Parámetro	Valor
pH	7.5
Materia orgánica	85%
Nitrógeno	2,60%
Fósforo	1,50%
Potasio	1,00%

Tabla 9 Valores típicos biogás análisis base seca

La aplicación del efluente al suelo le trae beneficios similares a los que se alcanzan con cualquier materia orgánica. Es decir, que actúa como mejorador de las características físicas, facilitando la aireación, aumentando la capacidad de retención de humedad y la capacidad de infiltración del agua.

Además, la digestión anaerobia tiene la ventaja de reducir los olores producidos por la descomposición y la carga contaminante propia de la materia orgánica. Además por desarrollarse en ausencia de oxígeno, el proceso reduce los microorganismos que pueden causar enfermedades en personas y animales a niveles seguros en menor tiempo que otros tratamientos.

Tras el proceso de la digestión anaerobia, también podemos comparar la producción de biogás para hacer una comparativa con otras fuentes de energía para establecer parámetros de equivalencia. A continuación, se muestra una tabla demostrativa:

1000 litros(1 m ³) de biogás equivale a:	
Madera	1,3 kg
Bosta seca	1,2 kg
Alcohol	1,1 litros
Gasolina	0,75 litros
Gas-oil	0,65 litros
Gas natural	0,76 m ³
Carbón	0,7 kg
Electricidad	2,2 KW/h

Tabla 10 Equivalencias energéticas del biogás

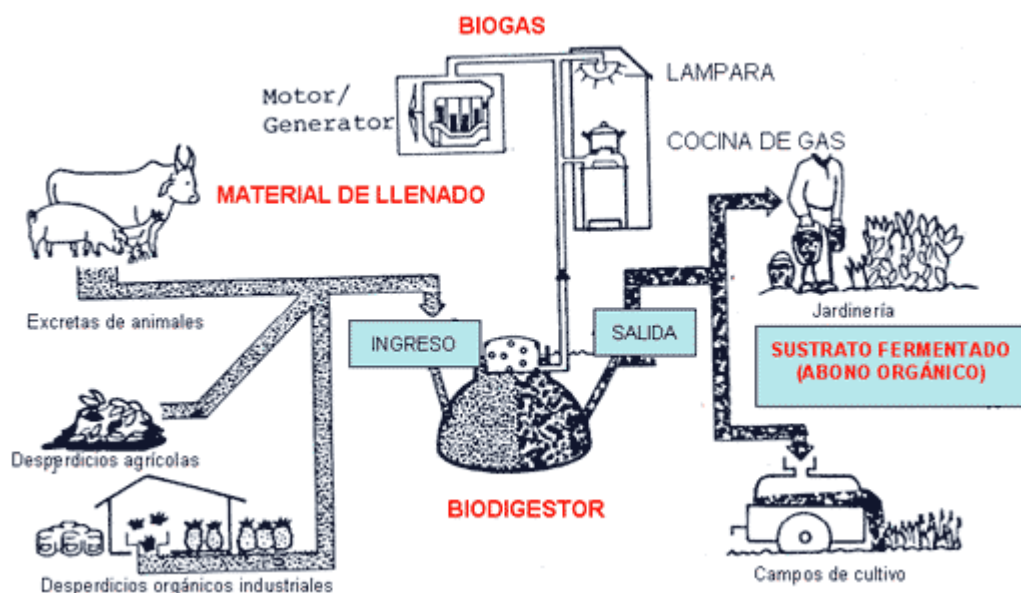


Figura 19 Diferentes usos de los productos derivados de la Digestión Anaerobia

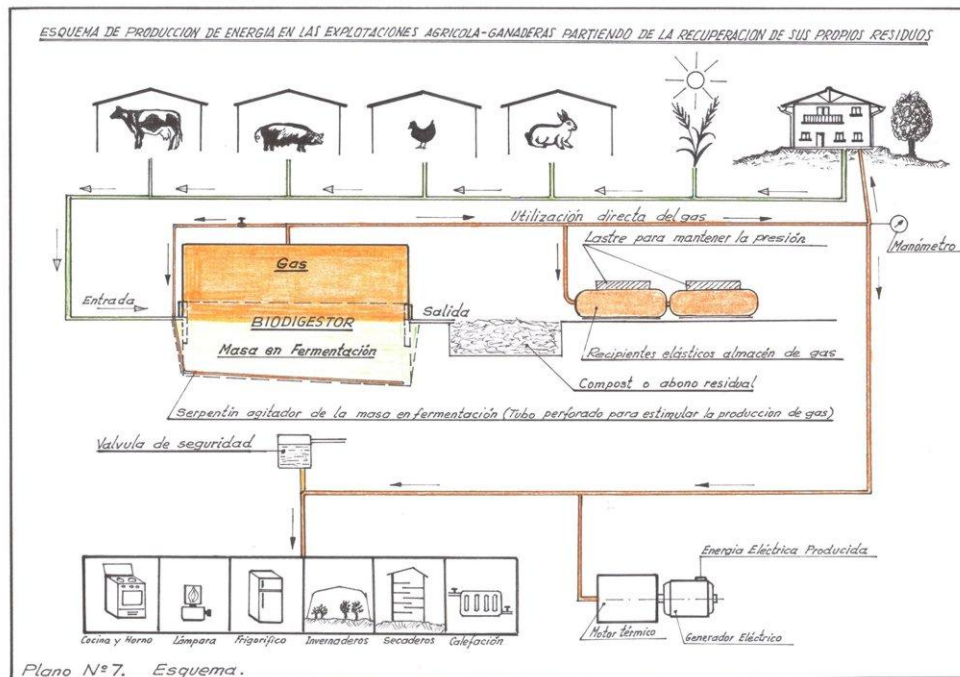


Figura 20 Posibles usos del biogás

2.7 Ventajas de los digestores anaerobios

Se utiliza, entre otros, en los siguientes casos:

- ✓ Aprovechamiento energético del biogás producido en plantas de depuración anaerobia de aguas residuales de elevada carga orgánica (cerveceras, alcoholeras, azucareras, mataderos, etc.).
- ✓ Tratamiento de residuos ganaderos (purines, estiércol, gallinaza) con producción y aprovechamiento de biogás para su uso en granja.
- ✓ Digestión anaerobia de distintos residuos orgánicos de origen agroalimentario (hortofrutícolas, agrícolas, grasas, etc.) para la producción y aprovechamiento del biogás generado.
- ✓ Obtención de abonos orgánicos (sólidos o líquidos) de alto valor añadido, a partir del producto resultante de la digestión anaerobia donde se produce el biogás.
- ✓ Utilización del biogás en el secado y estabilización de residuos orgánicos agroalimentarios de alta humedad, para facilitar su gestión.

- ✓ Los residuos orgánicos son problemáticos ya que se generan en grandes cantidades, tienen una alta humedad y son fácilmente putrescibles, por lo que la nueva normativa medioambiental ha reducido drásticamente su deposición en vertederos. Con su aprovechamiento energético en forma de biogás, es posible transformar un problema en una oportunidad, por las siguientes ventajas:
- ✓ El residuo fermentado está más estabilizado que el material original, pudiendo ser utilizado para diversos usos con o sin tratamiento posterior (aplicación directa al suelo, compostaje, abono, etc.).
- ✓ La humedad no es un problema en la producción de biogás, se pueden tratar distintos residuos conjuntamente, reduce el problema de olores, etc.
- ✓ Utilización del biogás como combustible para calderas y motores de cogeneración o para calefacción.
- ✓ Rendimientos económicos atípicos: ingresos adicionales por gestión de residuos de terceros, venta de abonos orgánicos, ahorro en energía (eléctrica y térmica), acceso a subvenciones por tratarse de una energía renovable.
- ✓ Una de las formas en que se puede tratar el estiércol para reducir la contaminación atribuible a explotaciones pecuarias es mediante proceso de biodigestión. De esta manera los biodigestores se constituyen como alternativa tecnológica apropiada, contribuyendo a disminuir problemas sanitarios, y obtención de productos útiles para la iluminación, calefacción, biofertilizantes, así como complemento alimenticio en animales.

2.8 Calorímetro de Junkers

El calorímetro es un instrumento que sirve para medir las cantidades de calor suministradas o recibidas por los cuerpos. Es decir, sirve para determinar el calor específico de un cuerpo, así como para medir las cantidades de calor que liberan o absorben los cuerpos.

El tipo de calorímetro de uso más extendido consiste en un envase cerrado y perfectamente aislado con agua, un dispositivo para agitar y un termómetro. Se coloca una fuente de calor en el calorímetro, se agita el agua hasta lograr el equilibrio, y el aumento de temperatura se comprueba con el termómetro. Si se conoce la capacidad calorífica del calorímetro (que también puede medirse utilizando una fuente corriente de calor), la cantidad de energía liberada puede calcularse fácilmente. Cuando la fuente de calor es un objeto caliente de temperatura conocida, el calor específico y el calor latente pueden ir midiéndose según se va enfriando el objeto. El calor latente, que no está relacionado con un cambio de temperatura, es la energía térmica desprendida o absorbida por una sustancia al cambiar de un estado a otro, como en el caso de líquido a sólido o viceversa. Cuando la fuente de calor es una reacción química, como sucede al quemar un combustible, las sustancias reactivas se colocan en un envase de acero pesado llamado bomba. Esta bomba se introduce en el calorímetro y la reacción se provoca por ignición, con ayuda de una chispa eléctrica.

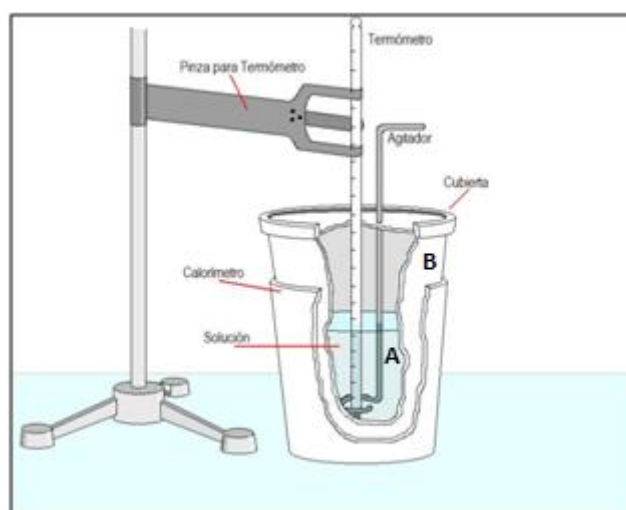


Figura 21 Calorímetro experimental

Los calorímetros suelen incluir su equivalente, para facilitar cálculos. El equivalente en agua del calorímetro es la masa de agua que se comportaría igual que el calorímetro y que perdería igual calor en las mismas circunstancias. De esta forma, sólo hay que sumar al agua la cantidad de equivalentes.

2.8.1 Ventajas, desventajas y tipos de calorímetros

Los calorímetros presentan como ventajas: una alta precisión y estabilidad en la calibración. Por otro lado, como desventajas presentan: una baja velocidad de respuesta y suelen ser muy voluminosos. Por último, podríamos hacer una clasificación según tipo, tenemos 4: Estáticos, No estáticos, Permanentes y Pre-térmicos

2.8.2 Método utilizado para obtener el poder calorífico inferior

El método calorimétrico propuesto consiste en quemar en idénticas condiciones de temperatura y presión un volumen de biogás (cuyo poder calorífico se quiere determinar) y el mismo volumen de un gas cuyo poder calorífico se conoce de antemano. Ambos volúmenes se queman calentando un litro de agua por vez, y en base a la variación de temperatura lograda en cada uno de los 2 ensayos, las masas de ambos gases y el poder calorífico del gas conocido, se puede calcular el poder calorífico del gas incógnita. La cantidad de gas quemada en ambos casos es de 5 litros, y ésta cantidad se encuentra confinada en un gasómetro, donde una columna de agua actúa tanto de sello hidráulico como de columna de presión. Las 2 muestras de gas se queman de a una por vez en el mismo mechero de Bunsen, y los 2 ensayos se hacen uno a continuación del otro, en idénticas condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica.

2.9 Orsat

El Aparato de Orsat es un analizador de gases usado para determinar la composición de una muestra de gases. Durante un análisis una muestra es pasada a través de líquidos absorbentes que remueven componentes específicos.

El volumen del gas es medido antes y después de la absorción. La disminución en el volumen del gas representa la cantidad del componente que estuvo presente. Los volúmenes del gas son medidos a temperatura y a presión constante.

2.9.1 Funcionamiento

El biogás que se obtiene en un biodigestor, está compuesto en mayor proporción por gas combustible metano (CH_4) y por anhídrido carbónico (CO_2). El aparato de Orsat dispone normalmente de 3 buretas de quimisorción que permiten determinar los

porcentajes de CO_2 , O_2 , y CO . Sólo se utilizará una para determinar anhídrido carbónico, ya que monóxido de carbono (CO) no se produce en el biodigestor y el reactivo para determinar el oxígeno (ácido pirogálico) es extremadamente costoso.

Este aparato suele ser utilizado en el análisis de gases de combustión, con el fin de tener una exacta noción de la eficiencia con que se está conduciendo el fuego en la marcha de una caldera. Para este uso es conveniente que la bureta medidora disponga de una camisa de agua para mantener el gas a temperatura ambiente y evitar variaciones de volumen con la temperatura.

Es un método volumétrico industrial porque proporciona rápidamente la proporción volumétrica en que aparecen determinados componentes de un gas, con una estructura portátil. Además hay numerosos modelos de aparatos para el análisis de gases, como el de Hempel, de Bunte, de Ambler, de Bone y Wheeler, etc. que permiten análisis similares.

Dicho aparato consiste en una bureta graduada de cincuenta mililitros o cien ml, con escala de cero a cien, conectada por su parte inferior por medio de un tubo de goma a un frasco nivelador, y en su parte superior a tres (3) recipientes dobles que contienen sustancias apropiadas para absorber los tres gases objeto de la medición. Cada uno de los tres recipientes consisten en dos tubos anchos unidos por un tubo pequeño en forma de U, todos con una válvula que permite el paso y la salida del gas que es objeto de análisis; la bureta está rodeada por un cilindro lleno de agua con el objeto de mantener la temperatura del gas.



Figura 22 Analizador Orsat

En el primer recipiente se coloca una solución de hidróxido de sodio (33 gramos en 100 centímetros cúbicos de agua) esta absorbe el dióxido de carbono, en el segundo recipiente se coloca una mezcla de dos soluciones, (10 gramos de ácido pirogálico en 25 centímetros cúbicos de agua y potasa cáustica en la misma proporción que en el envase número 1), esta mezcla absorbe el O_2 (oxígeno); en el tercer recipiente se coloca cloruro cuproso (250 gramos de cloruro amónico en 750 centímetros cúbicos de agua y se agregan 250 gramos de cloruro cuproso); conviene colocar en el frasco que contiene los reactivos algunos tejidos de cobre para que haya mayor absorción.

2.9.2 Descripción

El analizador Orsat consta de las siguientes partes:

1. Bureta medidora: se utiliza con el fin de obtener una muestra de determinado gas y debe estar graduada para obtener una muestra de 100ml y se encuentra en el interior de una camisa de agua (con el fin de mantener constante la temperatura de la medición).
2. Frasco nivelador: se utiliza con el fin de hacer pasar el gas a través de los frascos que contienen los reactivos de absorción. Se llena con 200 ml de una solución de agua destilada, cloruro de sodio, ácido clorhídrico y una gota de naranja de metilo y se denomina líquido de cierre.

3. Recipientes de absorción: se utilizan con el fin de hacer pasar el gas a través de una solución absorbente. Para este tipo de análisis se pueden determinar tres tipos de gases: CO₂ (por medio de una solución de hidróxido de potasio), O₂ (por medio de una solución de ácido pirogálico) y CO (por medio de una solución de cloruro cuproso).

4. Bombas: deben estar conectadas a los recipientes con el fin de que el gas se aloje durante el proceso de absorción.

2.9.3 Desarrollo Teórico

El análisis de los gases se realiza de acuerdo con la ley de Amagat que establece que en una mezcla gaseosa, la suma de los volúmenes de los componentes es igual al volumen total de la mezcla. Por otra parte existen reactivos químicos que absorben selectivamente, por un proceso de quimisorción, los componentes de la mezcla

Entonces para el biogás se tiene:

$$V = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CH}_4} + V_{\text{otros}}$$

Ahora, si por medio de un reactivo adecuado se absorbe el CO₂ tendremos:

$$\% V_{\text{CO}_2} = [V - (V_{\text{CH}_4} + V_{\text{otros}})] / V$$

En el aparato de Orsat esto se realiza sobre un volumen $V = 100 \text{ cm}^3$ que facilita la medición, leyendo directamente el volumen de gas absorbido. El resto (no absorbido) está constituido por metano (CH₄) y los otros gases que supuestamente se encuentran en mucha menor proporción.

3 Memoria Justificativa

3.1 Conceptos teóricos de cálculo

El tamaño del digestor (volumen del digestor V_D) es determinado por el tiempo de retención (T_R) y por la cantidad diaria de cieno de fermentación o carga de biomasa. La cantidad de carga de fermentación se compone del material de fermentación y del agua de mezcla.

El volumen del digestor se obtiene con la siguiente fórmula:

$$V_D (1) = C_f (1/\text{día}) \times T_R (\text{días})$$

Si se conoce el volumen del digestor y la cantidad de cieno de fermentación, se puede calcular el tiempo de retención efectivo según la siguiente fórmula:

$$T_R (\text{días}) = V_D (1) \div C_f (1/\text{día})$$

Si se conoce el volumen del digestor y se desea un determinado tiempo de retención, se puede calcular la cantidad diaria de relleno con la siguiente fórmula:

$$C_f (1/\text{día}) = V_D (1) \div T_R (\text{días})$$

Si una planta de biogás no es cargada diariamente, sino con intervalos de varios días, con igual porción de cieno de fermentación (P), disminuye la cantidad diaria de relleno (C_f). El tiempo de retención aumenta, por lo tanto, análogamente.

3.2 Cálculos biodigestor

Cuando queremos obtener los parámetros de un biodigestor para dimensionarlo, debemos hacer el cálculo exacto del volumen que se debe disponer en el digestor, para lograr el procesamiento completo de la biomasa en el lugar donde se desea implantar la tecnología.

Para determinar el volumen de una instalación de biogás se requiere de algunos datos primarios, mediante los cuales se determinará su capacidad requerida. Esos datos pueden ser considerados como las variables de estudio:

- Especie animal de la que se dispone
- Cantidad de animales con los que se cuenta
- Peso vivo promedio de los animales por especie
- Producción de estiércol por peso vivo, en %

- Producción de biogás por kg de estiércol
- Horas de estación en el establo o corral

Para demostrar los cálculos del biodigestor, vamos a exponer un ejemplo que muestre de forma simplificada los pasos a seguir para dimensionar el equipo:

Paso 1: Producción total de estiércol

Para este caso tenemos una finca con cerdos, caballos y bueyes. Para los cerdos se tiene un tiempo de estación de 24 horas por día, mientras que los caballos y los bueyes tienen una estación de 12 horas como promedio en el establo, por lo que la cantidad de estiércol que se podrá recoger estará afectada por este tiempo de estación.

$27 \text{ kg/cerdo} + (225 \text{ kg/caballo} + 144 \text{ kg/buey}) * 12 \text{ h}/24 \text{ h} = 221,5 \text{ kg totales estiércol/día.}$

Paso 2: Agua necesaria

Para formar la biomasa que se pretende digerir es necesario añadir 3 kg de agua por cada kg de estiércol (proporción 1:3). Algunos estudios recomiendan la relación agua-estiércol en dependencia del animal del cual provenga la excreta, para garantizar un desarrollo adecuado de la anaerobiosis metanogénica.

Para este ejemplo se tomarán 3 kg de agua por cada kg de estiércol, para garantizar las condiciones críticas de operación:

$$3 \text{ kg agua/kg estiércol} * 221,5 \text{ kg estiércol/día} = 664,5 \text{ kg agua/día}$$

Paso 3: Biomasa disponible

Con esta cantidad de agua se forma la totalidad de la biomasa que se debe degradar.

$$221,5 \text{ kg estiércol} + 664,5 \text{ kg agua/día} = 886 \text{ kg biomasa/día}$$

Paso 4: Volumen diario de biomasa

Para el tratamiento se recomienda emplear un metro cúbico de capacidad en el biodigestor por cada 1.000 kg de biomasa, pues se considera que la biomasa, formada en sus tres cuartas partes por agua, posee una densidad equivalente a la de ésta.

$$V_L = 0,886 \text{ m}^3/\text{día}$$

Paso 5: Tiempo de retención de la biomasa

Dado que el material biodegradable requiere de un tiempo para su descomposición total en sus elementos principales, se procederá a su determinación, para en última instancia calcular el volumen de trabajo del biodigestor.

Bajo la acción de bacterias mesofílicas se estima que en un reactor normal a 30 °C el tiempo requerido para biodegradar la materia prima alimentada es de 20 días, tiempo que se puede afectar por las variaciones de la temperatura ambiental.

$$T_R = 20 \text{ días} * 1,3 = 26 \text{ días}$$

El factor 1,3 es un coeficiente que depende de la temperatura, y para garantizar un funcionamiento óptimo del biodigestor en cualquier época del año se ha asumido el valor de 25 °C.

Paso 6: Volumen de digestión de la biomasa

$$V_L = 0,886 \text{ m}^3/\text{día} * 26 \text{ días} = 23,036 \text{ m}^3$$

Paso 7: Volumen de almacenamiento de gas

La capacidad requerida en el biodigestor para la acumulación de la biomasa es de 23 m³, de modo que será necesario determinar cuál es el volumen requerido para acumular el gas producido diariamente.

$$V_G = 27 \text{ kg/cerdo} * 0,07 \text{ m}^3/\text{kg} + (225 \text{ kg/caballo} + 144 \text{ kg/buey}) * 12 \text{ h}/24 \text{ h} * 0,04 \text{ m}^3/\text{kg} = 9 \text{ m}^3$$

Paso 8: Volumen total del biodigestor

$$V_T = V_L + V_G = 23 \text{ m}^3 + 9 \text{ m}^3 = 32 \text{ m}^3$$

Con la cantidad de animales disponibles en este ejemplo, se requiere de un biodigestor con una capacidad de 32 m³.

Esta metodología puede seguirse para diseñar biodigestores familiares de bajo costo, con diferentes tipos de animales, haciendo codigestión o utilizando residuos orgánicos.

3.3 Cálculos nuestro biodigestor

Para el caso de los biodigestores que se implementaron en nuestro Laboratorio de Biomasa el cálculo es bastante sencillo puesto que la carga es única ya que el digestor es tipo Batch. Sólo se pensaría en recargar con cieno de fermentación (C_f) después de los 3 meses cuando ya la digestión anaerobia se ha desarrollado al máximo en todo el sustrato administrado en la primera carga.

Los parámetros que están fijados en nuestros digestores desde un principio son:

- ✓ Volumen total del biodigestor es $V_D = 25$ galones. Eso quiere decir que el volumen líquido será de $V_L = 2/3$ de 25 galones y el volumen gaseoso será de $V_G = 1/3$ de 25 galones
- ✓ Proporción 1:1 al utilizar de sustrato estiércol de vaca, estiércol de cerdo y codigestión de ambos sustratos
- ✓ Definimos un T_R mínimo de 25 días

Luego la cantidad de biogás que se producirá durante el tiempo de residencia dentro del biodigestor será en función del tipo de sustrato:

Caso 1: Estiércol de Vaca – Cargado el 31 de Agosto

- La cantidad de sustrato suministrado fue 31,5 kg
- La cantidad de agua suministrada fue 31,5 kg

$$V_G (\text{producido previsto}) = 31,5 \text{ kg} * 0,04 = 1,26 \text{ m}^3$$

Caso 2: Estiércol de Cerdo – Cargado el 2 de Septiembre

- La cantidad de sustrato suministrado fue 31,5 kg
- La cantidad de agua suministrada fue 31,5 kg

$$V_G (\text{producido previsto}) = 31,5 \text{ kg} * 0,07 = 2,2 \text{ m}^3$$

Caso 3: Estiércol de Vaca – Cargado el 10 de Septiembre

- Ídem al caso 1, pero en camisa de agua

Caso 4: Estiércol de Vaca y Cerdo en Codigestión – Cargado el 10 de Septiembre

- La cantidad de sustrato total suministrado fue de 31 kg repartida de la siguiente manera: 14,4 kg de estiércol de cerdo y 16,6 kg de estiércol de vaca
- La cantidad de agua suministrada fue 31,5 kg

$$V_G(\text{producido previsto}) = [(14,4 \text{ kg} * 0,07) + (16,6 * 0,04)] = 1,672 \text{ m}^3$$

3.4 Cálculos calorímetro

A continuación, se exponen los cálculos necesarios para obtener el poder calorífico inferior del biogás mediante el uso del calorímetro de Junkers.

El experimento se debe realizar tal que:

Exactamente a una distancia de 2 cm por encima del mechero de Bunsen se coloca un matraz aforado conteniendo 1 litro de agua con un termómetro en su interior, que medirá la variación de temperatura desde el comienzo del ensayo hasta el final del mismo en las 2 experiencias (biogás y gas de poder calorífico conocido). La repetición de las condiciones de ambos ensayos (ambientales, de posición de los instrumentos y de ubicación relativa de los mismos, etc.), garantiza y posibilita que el rendimiento de la combustión (es decir el calor recibido por el agua dentro del matraz dividido el calor entregado por la llama) sea igual en ambos casos. Esta igualdad en los rendimientos de la combustión se utilizará para relacionar ambos ensayos y calcular así el poder calorífico incógnita, tal como se verá más adelante. A continuación, en la figura 22 se observa un esquema de la disposición de los equipos y elementos mencionados anteriormente:

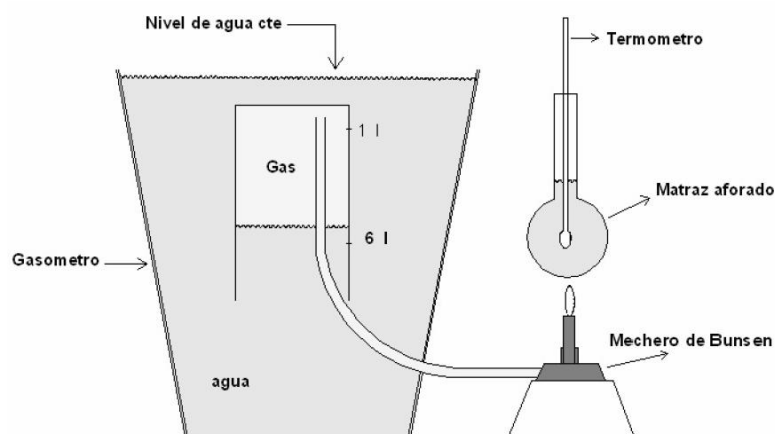


Figura 23 Esquema calorímetro

3.4.1 PCI biogás

Como para este proyecto por problemas logísticos y contratiempos no se pudo realizar esta prueba, se va a exponer un ejemplo de cálculo de cómo se debe calcular el PCI de la muestra del biogás que vayamos a estudiar teniendo como referencia un gas con PCI conocido.

Bien, para la realización de los ensayos se usó como gas de referencia una garrafa de 25 libras cargada con isobutano de alta pureza, comercializado como ecobutano, cuyo poder calorífico inferior (certificado por la envasadora de gas y coincidente con la bibliografía encontrada) de:

Temp. amb. °C	P atm mm de Hg	P manométrica cm de agua	Volumen inicial litros	Volumen final litros	Temperatura inicial agua °C
24,8	750	12	6	1	23,7

Tabla 11 Valores promedio comunes

Poder calorífico inferior: 25.990 kcal / m³

El valor de 12 cm de columna de agua como presión manométrica es el promedio entre la presión del gas en el inicio de la combustión y la presión al final.

Primero se calculará la masa de isobutano contenida en los 5 litros:

$$\text{Para } V = 5 \text{ litros} = 5 \text{ dm}^3$$

$$T = 297,8 \text{ }^\circ\text{K}.$$

$$P = \text{presión atm.} + \text{pres. manométrica} = 1,031625 \text{ kg/cm}^2$$

$$R_{\text{particular del isobutano}} = 14,15 \text{ kgm / kg } \cdot \text{ }^\circ\text{K}$$

Para estos valores, de acuerdo a la ecuación de estado de los gases, da una masa

$$\mathbf{Mi = 0,01224 \text{ kg de isobutano.}}$$

La masa de biogás (Mb) contenida en los 5 litros se calculará también por la ecuación de estado:

$$\text{Para } V = 5 \text{ litros} = 5 \text{ dm}^3$$

$$T = 297,8 \text{ }^\circ\text{K}.$$

$$P = \text{presión atmosférica} + \text{presión manométrica} = 1,031625 \text{ kg/cm}^2$$

$$R_{\text{particular del biogás}} = 31,172 \text{ kgm / kg } \cdot \text{ }^\circ\text{K}$$

Para estos valores, da una masa Mb = 0,0055565 kg de biogás

Biogás			Isobutano		
Tf	ΔT	Duración	Tf	ΔT	Duración
°C	°C	segundos	°C	°C	segundos
40,2	16,5	414	74,7	51	484

Tabla 12 Valores finales para biogás e isobutano

Isobutano: se calculará a continuación el calor entregado por el isobutano al quemarse Qi, que será igual al producto de su poder calorífico pci multiplicado por su masa Mi. Se tomará una densidad del isobutano Di de 2,67 kg/m³

$$Qi = pci * Mi / Di = 25.990 \text{ Kcal/m}^3 * 0,01224 \text{ kg} / 2,67 \text{ kg/m}^3 = 119,145 \text{ Kcal}$$

Por otro lado, al quemarse el isobutano, el agua contenida en el matraz de 1 litro recibe una parte de ese calor. El calor recibido por el agua Q_{ai} se calculará de acuerdo a la ecuación fundamental de la calorimetría:

$$Q_{ai} = m * c_e * T = 1 \text{ kg} * 1 \text{ kcal / kg} \cdot ^\circ\text{C} * 51 ^\circ\text{C} = 51 \text{ kcal}$$

De todo el calor entregado por el isobutano al quemarse, solo una parte es aprovechada por el agua, el resto se pierde o desaprovecha. Se puede calcular entonces el rendimiento de ésta combustión:

$$\text{Rendimiento} = Q_{ai} / Q_i = 51 \text{ Kcal} / 119,145 \text{ Kcal} = 0,428$$

Rendimiento gas referencia = 0,428

Este rendimiento al quemar el isobutano, se supone que es el mismo al quemar el biogás, ya que todas las condiciones en ambas combustiones son iguales (presión y temperatura del gas, presión y temperatura ambiente, ubicación relativa entre el mechero y el matraz, etc.). A partir de esta suposición se comienza el cálculo de los parámetros del biogás yendo hacia atrás.

Biogás: Al quemarse el biogas, el agua contenida en el matraz de 1 litro recibe una parte de ese calor. El calor recibido por el agua Q_{ab} se calculará de acuerdo a la ecuación fundamental de la calorimetría:

$$Q_{ab} = m * c_e * T = 1 \text{ kg} * 1 \text{ kcal / kg} \cdot ^\circ\text{C} * 16,5 ^\circ\text{C} = 16,5 \text{ Kcal}$$

El calor entregado por el biogás al quemarse Q_b , se calculará en función del rendimiento de la combustión y de Q_{ab} :

$$Q_b = Q_{ab} / \text{Rend.} = 16,5 \text{ Kcal} / 0,42805 = 38,5469 \text{ Kcal}$$

El calor entregado por el biogás al quemarse Q_b , será igual al producto de su poder calorífico P_{cb} multiplicado por su masa M_b . Se tomará una densidad del biogás D_b de 1,08 kg/m³. De esta igualdad se despejará nuestra incógnita, que es el poder calorífico del biogás P_{cb}

$$Q_b = p_{ci} \text{ biogás} * M_b / D_b \rightarrow P_{ci} \text{ biogás} = Q_b * D_b / M_b = 38,5469 \text{ kcal} * 1,08 \text{ kg/m}^3 / 0,0055565 \text{ kg}$$

$$\mathbf{P_{cb} = 7.492,24 \text{ kcal/m}^3}$$

3.5 Comparativa de resultados, análisis y conclusiones

Esta apartado del tema, queda un poco escueto ya que tenemos pocas referencias y datos donde poder sacar conclusiones ya que no se pudieron hacer las pruebas del calorímetro, aún así, sí que tenemos algunos datos al menos que comentar sobre los tiempos de residencia o sobre los biodigestores trabajando en diferentes atmósferas (temperatura ambiente y camisa de agua).

Para analizar los experimentos hechos vayamos por partes:

1. **Tiempo de Retención o Residencia (T_R):** En cuanto a los T_R cabe reseñar que los biodigestores en camisa de agua, aunque se pusieron en marcha una semana más tarde, a los 15-20 días ya estaban produciendo biogás a buen ritmo. Además, al estar monitorizada la temperatura de trabajo no sólo favoreció en la disminución de los tiempos de retención, sino que también ayudo a mantener la temperatura de trabajo del sustrato evitando la creación de ‘natas’ en la superficie del sustrato y que se produjeran condensaciones dentro de los depósitos. Por último, la camisa de agua también ayudó a actuar como sello hidráulico.
2. **Biodigestores Temperatura Ambiente:** Su producción de biogás se vio entorpecida y ralentizada por las temperaturas bajas y gran humedad que hubo en la etapa final del mes de septiembre de 2010 ya que llovió más de lo normal en Managua y la tierra estaba saturada y no podía absorber más agua. Además, se produjo una capa de nata en la superficie del sustrato que no dejaba subir al biogás con lo que tuvimos que improvisar un agitador manual. De hecho, se llegó a medir la temperatura del sustrato a 23,7 °C con lo que eso conlleva a que el tiempo de retención subiera y bajase el ritmo de producción de biogás. Sin embargo, por otro lado, los valores de pH del sustrato estaba en un rango de valores óptimos. Además, creemos que no se estaban llenando los neumáticos de coche (gasómetros) porque la toma de salida del biogás debía estar obstruida por algún motivo, ya que haciendo una prueba de drenaje, éste salió con bastante presión.

3. **Biodigestores en Camisa de Agua:** Definitivamente han sido los más eficaces de todos, porque el agua que envuelve al depósito ha ayudado a controlar la temperatura de trabajo, ha prevenido las condensaciones, ha evitado que se formase la ‘nata’ en la superficie del depósito y por supuesto, no se han enterado de las inclemencias del tiempo y las fluctuaciones térmicas.
4. **Experimentos:** Por los problemas de contratiempos con trámites burocráticos en la UNI y comunicación con España es lo que nos condujo a no poder acabar de construir el gasómetro de campana flotante para poder hacer la prueba el biogás, pero sí que quedó construido y montado todo el laboratorio para hacer las pruebas en los días siguientes a mi vuelta.
5. **Laboratorio de Biomasa:** Afortunadamente, se pudo acabar todo el papeleo, gestiones, trabajos de adecuación, mobiliario y equipación para poder hacer la apertura oficial del espacio de trabajo y estar listo para comenzar a trabajar. De hecho, tras mi vuelta de Nicaragua el 12 de Octubre, ya iban a poder empezar a hacer los primeros experimentos con el calorímetro.

3.6 Trabajos futuros: Posibilidades y Líneas de trabajo

3.6.1 Posibilidades

Las posibilidades que tiene este laboratorio son casi infinitas ya que cualquier idea que esté relacionada con este apartado de las energías renovables y que tenga viabilidad es susceptible de tener apoyo y poder trabajar alrededor de esa propuesta concreta para hacer un trabajo monográfico o bien buscar futuras líneas de investigación. Los procedimientos de acción, serían: primero llevar la propuesta al profesor responsable y segundo desarrollar un pequeño plan de acción para verificar que la idea es viable.

3.6.2 Líneas de Trabajo

Como trabajos futuros o líneas de trabajo a continuación de este Proyecto Fin de Carrera se proponen los siguientes:

- ✓ Revisión y mejora de los biodigestores que se han construido en este proyecto, analizando donde pueden ser mejorados. Por ejemplo: añadiendo un agitador temporizado con un pequeño motor para que trabaje de forma autónoma o mejora de las conexiones para evitar ningún tipo de fuga haciendo pruebas de presión más exhaustivas.
- ✓ Construcción de un equipo Orsat para el análisis de la composición del biogás.
- ✓ Adaptación de cocinas, lámparas, utensilios caseros o de granjas donde se pueda transferir este tipo de tecnología para sacarle partido
- ✓ Revisar los acuerdos marcos con las diferentes Alcaldías de Managua para hacer un estudio de viabilidad de implantación de sistemas de biodigestión en todas las granjas o familias agricultoras para aumentar la implantación de esta tecnología apropiada.
- ✓ Hacer un plan de viabilidad de consumo energético para medir la cantidad de biogás necesario para que si se implantase este sistema en una vivienda unifamiliar fuese autónoma.
- ✓ Estudio de efectividad del biogás obtenido en el proceso de digestión anaerobia y ver que biogás es trabaja de manera más eficiente en motores de diferentes tipos (2 tiempos, 4 tiempos, etc.).
- ✓ Monitorización, control y automatización de los digestores mediante el uso de sensores para controlar la atmósfera de trabajo y mejorar el proceso de producción de biogás para tener un menor tiempo de retención, proceso más controlado, etc.
- ✓ Análisis químico y comparativo en profundidad sobre las eficiencias de los diferentes sustratos obtenidos en diferentes atmósferas de trabajo, en codigestión o comparativa entre residuos animales u orgánicos.

4 Cronología del Proyecto: Cuaderno de Bitácora

El proyecto lo podemos dividir en 3 bloques de un mes que, más o menos, están bien diferenciados. A continuación, se pasa a redactar uno por uno.

4.1 Bloque I – 15 Julio – 15 de Agosto

Este primer mes de estancia en Nicaragua, por diferentes motivos casi no se pudo avanzar en el proyecto debido a que fue un período de tiempo con bastantes días de vacaciones.

Semana 1 – 19 al 23 de Julio

Para empezar, cabría reseñar esta primera semana de mi llegada a Nicaragua coincide con una semana de casi inactividad docente en la UNI. En esta semana fueron las celebraciones del 31º aniversario de la Revolución el 19 de Julio, el gobierno dio como día de asueto el martes 20 de julio y el viernes 23 coincide con el día del estudiante.

De este modo, esa primera semana tan sólo fue de aclimatación y toma de contacto con el personal de la UNI, así como con los responsables del proyecto María Teresa Castillo Rayo y Edgar Somarriba Lezama donde se pudo establecer un punto de referencia para saber en qué estado estaba el proyecto y tener una idea somera de la situación, conocer el recinto del RUPAP y un poco las instalaciones donde iba a desarrollar mi estancia en el futuro.

Semana 2 – 26 al 30 de Julio

En esta segunda semana, ya se pudo tener la primera reunión en firme para: Tere, Somarriba y yo poder establecer un nuevo **plan de trabajo acorde con mi estancia** en Nicaragua y de este modo **reformular el proyecto** ya que se tuvo que empezar desde cero. De esta forma, establecer objetivos realistas y realizables durante mi periplo de 3 meses. La situación real era la siguiente: no teníamos espacio asignado donde alojar el laboratorio y los biodigestores de 55 galones que habían sido contruidos había dado problemas de fugas, o bien por alguna toma defectuosa o por alguna manipulación indebida.

Por otro lado, durante esa semana, también pude mandar las primeras noticias sobre el proyecto a mi tutor Antonio Aznar en España, así como seguir documentándome sobre el proyecto.

Semana 3 – 2 al 6 de Agosto

En esta semana, nos reunimos con responsables de la FTI y la FTC para hablar y sentar las bases sobre la creación de un equipo multidisciplinar. Desafortunadamente, esta reunión fue más infructuosa que otra cosa ya que no se tomaron acciones ni cartas en el asunto para dar un paso adelante y finalmente pasó lo de siempre que todo quedó sobre el papel. Ya esta semana, recibí las noticias de cómo íbamos a recibir el dinero de la subvención del PCI y que yo sería el encargado de gestionar las compras. Finalmente, ese dinero no pudo llegar esa semana por cuestiones burocráticas en España con relación a la transferencia.

Durante esta semana, también se empieza a hacer las primeras cotizaciones sobre todos los materiales que se necesitan comprar para poner en marcha y construir los biodigestores. Del mismo modo, se continúa presionando a la Vicedecanatura para que se resuelva el tema de la concesión del espacio para establecer el laboratorio.

Semana 4 – 9 al 13 de Agosto

Esta semana, fue otra semana en balde, ya que fue la semana de descanso inter semestral y el recinto del RUPAP estuvo cerrado al público, luego no se pudo seguir con las gestiones de la obtención del espacio del laboratorio. Lo único positivo de esta semana de descanso forzoso fue que se hizo efectivo el dinero de la subvención y ya disponíamos de liquidez para poder empezar a hacer las primeras compras.

Así acaba el primer bloque del proyecto, con pocos avances en el mismo, pero también con poco tiempo efectivo para poder avanzar (sólo dos semanas completas de trabajo). Sin embargo, fue tiempo más bien de aclimatación al país, a la forma de trabajar, de entender los procedimientos de trabajo. y, por supuesto, de una gran inyección energética que suponía tener medios para poder empezar a trabajar.

4.2 Bloque II – 16 Agosto – 12 de Septiembre

Semana 5 – 16 al 20 de Agosto

En esta semana fue catalogada como crucial, ya que se unieron al proyecto dos alumnos de Ingeniería Mecánica (Jean Paul y Jorge Ronaldo respectivamente) que ayudarían en el proyecto y les serviría también para realizar su monografía de finalización de estudios. Esta semana finalmente, se consigue empezar a hacer las compras sobre algunas cotizaciones que habíamos hecho en las semanas anteriores. En las primeras compras, se obtienen los hierros para hacer las estructuras metálicas donde irán alojados los biodigestores, se compran los envases y gracias a que se hace presión y se nombra esta semana la situación de “crucial” para el proyecto en la Vicedecanatura, se consigue que nos cedan por fin el martes 17 de agosto el espacio donde irá alojado el laboratorio. Sobre el espacio cabe reseñar que está ubicado en el Taller Automotriz en uno de los cuartos que estaban siendo utilizados como trasteros (lleno de basura electrónica).



Figura 24 Laboratorio Biomasa 17 Agosto 2010

Ese mismo día, se desaloja el espacio y se manda a limpiar por los servicios de limpieza del RUPAP. En ese momento, se decide que hay que acondicionar el espacio, ya que no está aislado, ni en condiciones mínimas para poder establecer el laboratorio. De este modo, se pide presupuesto al servicio de Mantenimiento del RUPAP para que hagan los trabajos de acondicionamiento del Laboratorio. De forma paralela, se contratan los servicios de los soldadores para realizar los dos soportes donde irán alojados los biodigestores. Por un lado, un soporte para alojar los 3 biodigestores que irán al aire libre y por otro lado, un soporte donde irán los 2 biodigestores que estarán en “camisa de agua”. Al mismo tiempo, empezamos a trabajar en la construcción de los biodigestores. Cabe reseñar, a toro pasado, que las prisas son malas consejeras y por intentar ahorrar tiempo, nos pusimos a construir los 5 biodigestores a la vez, sin tener en cuenta los posibles fallos de fugas o problemas constructivos que podrían ocasionarse.

Al final del viernes 20 de agosto, ya estaban en fase de construcción las estructuras de los biodigestores, el laboratorio ya estaba acondicionado y la construcción de los biodigestores estaba en marcha, de una forma un tanto caótica, pero en marcha.



Figura 25 Laboratorio Biomasa 20 Agosto 2010

Semana 6 – 23 al 27 de Agosto

Nos hacen entrega del primer bastidor donde irán alojados los 3 biodigestores al aire libre. Nosotros, seguimos con la construcción de los biodigestores. Los primeros problemas importantes que tenemos son problemas de fugas de agua al no estar estancos los drenajes de 2" practicados en el fondo de los recipientes. De este modo, tenemos que idear diferentes soluciones para corregir estos problemas.



Figura 26 Equipo de Trabajo. De izquierda a derecha: Jorge, Jean, Tere y Edgar



Figura 27 Resto equipo de trabajo. Frank

Al final, cada uno de los biodigestores queda solucionado con una solución diferente. El biodigestor 1, se había quemado en primera instancia para que el fondo

estuviese algo abombado pero el acabado no nos gustó como quedaba. Al final ese biodigestor fue el que menos nos dio problemas a la hora de hacer el sellado estanco del drenaje. Los otros dos se solucionaron de forma similar, pero partiendo de la primera solución que funcionó donde se hizo un doble empaque de hule, con un adaptador de 3" a 2" y atornillado al fondo del biodigestor para evitar posibles fugas. También se le añadió silicona blanda y silicona caliente para asegurar el sellado y la estanqueidad de la toma. Después de haber solucionado las tomas inferiores, acabamos de hacer las tomas superiores de realimentación del biogás, alimentación, manómetro y salida del biol. A finales de semana ya pudimos empezar a hacer las primeras pruebas de presión gracias a un pequeño compresor que trajo Somarriba que tenía en su casa. Los biodigestores ya estaban listos para estar cargados, ahora solo quedaba conseguir vehículo para ir a por el sustrato a las fincas.



Figura 28 Biodigestores en construcción dentro del Laboratorio de Biomasa

Semana 7 – 30 Agosto al 3 de Septiembre

Esta semana por fin conseguimos ir a por el estiércol de vaca y cerdo. Para el estiércol de vaca no tuvimos ningún problema de conseguirlo en una finca de Tipitapa ya que había en abundancia en el establo que estuvimos. El problema radicaba en el

estiércol de cerdo ya que los establos se limpiaban a las 4 am y a esa hora era imposible poder ir a buscarlo. Así que obtuvimos la solución en la FACA (Facultad de Ciencias Agrarias) donde nos pudieron suministrar el estiércol de cerdo ya que nos hicieron el favor de dejarlo recogido por la mañana y que nosotros pasáramos a buscarlo.



Figura 29 Recogida del Sustrato de Vaca



Figura 30 En busca del sustrato

Finalmente, el lunes 30 de agosto quedó cargado el primero biodigestor al aire libre con estiércol de vaca a las 18 h. A lo largo de esa semana, conseguimos el estiércol de cerdo y el jueves 2 de Septiembre dejamos cargado el otro biodigestor con el

estiércol de cerdo a las 16.30 h. Cabe reseñar, que para cargar los biodigestores, se tuvo en cuenta una proporción 1:1 de estiércol y agua, dentro del recipiente, un tercio es para agua, un tercio para la carga y un tercio para el espacio donde se formará el biogás.



Figura 31 Carga biodigestor con estiércol de cerdo

En esta semana también, tengo la primera reunión con el decano de la FTI Daniel Cuadra donde le informo del estatus del proyecto, de las cosas que se están haciendo y donde le solicito ayudas de combustible, el pago de la mano de obra de los trabajos de soldadura y la mano de obra del acondicionamiento del laboratorio. En esta reunión se compromete a pagar la mano de obra de los trabajos realizados para el proyecto del Laboratorio de Biomasa.

Para esas fechas, ya habíamos decidido hacer los dos biodigestores en camisa de agua, sin drenaje para no dilatarnos más en el tiempo y porque buscarle una solución a los drenajes nos llevaría demasiado tiempo e íbamos a contrarreloj. De este modo, nos tocó operar de nuevo ambos biodigestores y ambos tanques piscina para cerrar el orificio de dos pulgadas donde iba a estar alojado el drenaje.

Semana 8 – 6 al 10 de Septiembre

Por fin, logramos meter a camino los biodigestores en camisa de agua y el viernes 10 de septiembre a las 18.00 quedaron cargados ambos digestores. Cabe reseñar, que para estos dos optamos: por un lado, duplicar el estiércol de vaca en uno de ellos y

en el otro, como no había suficiente estiércol de cerdo y teníamos estiércol de vaca de sobra por hacer un digestor en codigestión.



Figura 32 Carga Biodigestores en Camisa de Agua

El tener problemas en la construcción de los biodigestores y a la hora de conseguir vehículo para obtener los sustratos, fue lo que finalmente nos hizo decantarnos por sólo utilizar estiércol de vaca y cerdo en nuestros experimentos, ya que los lodos del Mercado de Mayoreo no se pudieron gestionar y para usar los desechos del RUPAP no pudimos obtener la máquina trituradora para deshacer los desechos naturales.

Así que el 10 de Septiembre, había ya 4 biodigestores en marcha funcionando en dos ambientes diferentes. Esta semana, se les paga un adelanto a los chavales encargados de los trabajos de soldadura, ya que estaban parados sin trabajar y la mesa diseñada a medida para el laboratorio que se les había encargado debía estar lista para el 20 de septiembre. Como las gestiones de la UNI se estaban eternizando, entonces, para desatascar el proyecto decidí pagarles una parte de la mano de obra por los trabajos ya completados de los soportes para los digestores y luego gestionarlo con la UNI ya que la semana siguiente sería crítica al tener 3 días festivos en la semana.

4.3 Bloque III – 13 Septiembre – 12 de Octubre

Semana 9 – 13 al 17 de Septiembre

Otra semana poco fructífera ya que el 13,14 y 15 de Septiembre fueron días de descanso por ser la celebración de la independencia de Nicaragua. Para esta semana, como ya habíamos decidido hacer la mesa para el laboratorio con el material sobrante de las estructuras que se habían hecho para los biodigestores y de esto modo, aprovechar el material. La mesa se encargó a los chavales de soldadura y se activaron a trabajar al haber recibido el dinero del pago por el trabajo anterior y parte del pago del siguiente.



Figura 33 Mesa Laboratorio en fase de construcción

Por otro lado, Jean y Jorge se deberían encargar de hacer las gestiones pertinentes para el gasómetro y el calorímetro (lista de materiales necesarios, construcción del gasómetro, etc.).

El viernes 17 de septiembre recibo la noticia desde España de que los gastos de mano de obra no son imputables ni justificables en la subvención, así que damos otro vuelco el proyecto y la mesa queda un tanto paralizada, ya que los chavales se piensan que no van a cobrar.

Como consejo para el futuro, estas cosas tenían que haberse definido y haber quedado zanjadas desde el principio. Por un lado, clarificar que la contraparte es la que

se encargaría de hacer los pagos de la mano de obra y por el lado de la subvención, clarificar que gastos eran imputables y cuáles no, para evitar problemas.

Semana 10 – 20 al 24 de Septiembre

Semana agitada, donde me dedico a gestionar el pago de la mano de obra por parte de la UNI para que sea reembolsado al proyecto. Para ello, redacto una carta y solicito el apoyo de los dirigentes estudiantiles por medio de los presidentes de carrera de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial. Una vez, que tengo su apoyo por escrito, me reúno nuevamente con el decano y le presento la situación en la que estamos para buscar una solución al problema que tenemos. Finalmente, se opta por contratar temporalmente a uno de los chavales del taller de soldadura que estaba trabajando sin contrato por valor de la deuda de mano de obra más un plus por el resto de trabajos que quedan por hacerse. En principio todo queda solucionado y a la espera de que se gestione el contrato y el pago posterior del mismo.



Figura 34 Trabajos de soldadura

En este tiempo, también compramos todo el material necesario para equipar el laboratorio y hacer los experimentos con el calorímetro. Sólo estamos a la espera de que se acabe de construir la mesa que ya lleva retraso.

Semana 11 – 26 de Septiembre al 1 de Octubre

Semana teórica para realizar los primeros test del gas referencia y la primera toma de biogás obtenido de los biodigestores al aire libre que se habían puesto a funcionar a principios del mes de septiembre.

La realidad del proyecto, es que la mesa va muy atrasada porque los chavales de soldadura se comprometieron a hacer un trabajo de carpintería para el que no estaban cualificados. Acabamos solucionando el tema por medio de un ultimátum y contratando a los carpinteros para realizar la colocación de la formica en la mesa del laboratorio. Finalmente la mesa queda colocada el viernes, a falta de que se atornillase a la pared, y se acabara de rematar unos pequeños detalles de la formica y los tiradores de las puertas.



Figura 35 Material de Laboratorio

Al final, decidimos hacer también gasómetros utilizando unos neumáticos de coche para guardar el biogás que se está produciendo en cada uno de los biodigestores.



Figura 36 Gasómetro en neumático de coche

En este sentido, tenemos buenas y malas noticias. Las malas noticias, son que los dos biodigestores que están trabajando a temperatura ambiente no están produciendo prácticamente biogás. Creemos que el factor más importante que está afectándoles es que en estas últimas semanas ha estado lloviendo demasiado y la temperatura ambiente ha bajado por debajo de la media normal (normalmente en torno a 29-30 °C). También ha aumentado la humedad, eso unido a que la situación del laboratorio no es la más idónea al tener un jardín al lado donde no ha podido drenar bien el agua, ha hecho que la temperatura del laboratorio haya bajado drásticamente, teniendo una temperatura de trabajo los biodigestores en su interior de tan solo 23,7 °C. Por eso y por posibles condensaciones de agua dentro de los biodigestores o que la salida del biogás este obstruida pueden ser los condicionantes que creemos que están afectando a que suba tanto el tiempo de retención. De este modo, en esta semana a parte de no tener la mesa finalizada tampoco hemos podido tomar muestras de estos biodigestores. Sin embargo, en el lado positivo, están los biodigestores en camisa de agua, que al estar termostatizados han estado trabajando mejor y ya están produciendo biogás a un buen ritmo. De hecho, el viernes 1 de octubre se probó la calidad del biogás quemándolo por medio del mechero de Bunsen y fue satisfactoria la prueba.



Figura 37 Preparación prueba piloto Biogás



Figura 38 Prueba llama al quemar muestra biogás

También, se mandaron a pedir los polos conmemorativos al proyecto del Laboratorio de Biomasa y que se utilizarán en el día de la inauguración.



Figura 39 Logo polo conmemorativo del PCI

Semana 12 – 4 al 8 de Octubre

Segunda semana para realizar los test en los biogases obtenidos para analizar el gas referencia y los biogases para comparar el PCI de cada uno de ellos. Como se especificó en la semana anterior, los digestores que estaban al aire libre están prácticamente parados y no sabemos si podrán producir suficiente biogás para ser probados. Por otro lado, uno de los digestores en camisa de agua ha bajado mucho su rendimiento y ha empezado a tener fuga de gas y aunque se ha podido atajar el problema ya no ha vuelto a su régimen de trabajo anterior ya que la producción de biogás ha descendido drásticamente. Sin embargo, el otro digestor en camisa de agua (el de estiércol de vaca) está produciendo gas a buen ritmo. También se está teniendo problemas con la cuantificación del gas en litros para poder realizar los experimentos del calorímetro, así que al final se ha decidido hacer un gasómetro de campana flotante. Por consiguiente, en esta semana finalmente no se ha podido realizar los experimentos que estaban proyectados debido a los retrasos en la entrega de la mesa y por problemas logísticos en el desarrollo del gasómetro.



Figura 40 Gasómetro vasos comunicantes



Figura 41 Gasómetro campana flotante

De forma paralela, se está organizando todo para la inauguración de la semana que viene, coordinando las últimas compras y gestionando los reembolsos de trabajos de mano de obra por parte de la UNI al proyecto ya que esos gastos no son justificables en la subvención otorgada al PCI.

Semana 13 – Inauguración del Laboratorio 11 de Octubre.

Le inauguración oficial se realizó para el día 11 de octubre de 2010. Al acto, fueron invitados diferentes miembros de la UNI como Decano de la FTI, Vicerrector de Investigación, Rector de la UNI o Personal investigador del Laboratorio de Biomasa (otro laboratorio, pero más puramente investigativo y no con pensamiento académico como este) entre otros. El acto se basó en una breve presentación de los trabajos realizados mediante diapositivas: hablando sobre la historia, objetivos, definiendo el laboratorio, plan de trabajos futuros y presupuesto del proyecto. Luego se hizo una visita al laboratorio y la correspondiente demostración del biogás siendo utilizado en un mechero bunsen. Por último, se hizo la foto oficial de la placa conmemorativa del laboratorio y se tomo un refrigerio con todos los asistentes a la inauguración del Laboratorio de Biomasa.



Figura 42 Acto Presentación PCI Laboratorio Biomasa



Figura 43 Placa conmemorativa inauguración oficial Laboratorio Biomasa



Figura 44 Parte del equipo de trabajo del PCI España-Nicaragua



Figura 45 Prueba oficial biogás Acto Apertura Laboratorio Biomasa

5 Construcción un Biodigestor tipo Batch

En este capítulo, se va a ilustrar los pasos que hay que seguir para construir un biodigestor tipo batch como el que se ha realizado en el Laboratorio de Biomasa de este proyecto.

5.1 Materiales necesarios

A continuación, se pone la lista detallada de los materiales necesarios para poder construir el biodigestor:

- ✓ Recipiente de plástico o metal (para nuestro caso ha sido de unos 100 litros por ser experimental, pero dependiendo del uso habría que dimensionar el tamaño necesario para que cubra las necesidades de abastecimiento de biogás del sitio donde se vaya a instalar)
- ✓ Llave metálica ó plástica de bola de 2" para el drenaje.
- ✓ 2 Llaves metálicas o plásticas de bola de 1/2" para la salida del biol y para la salida del biogás.
- ✓ 5 Adaptadores macho de PVC de 1/2"
- ✓ 3 Adaptadores macho de 2" para la toma de alimentación y el drenaje
- ✓ 2 codos de PVC de 90° de 1/2"
- ✓ 2 codos de PVC de 45° de 1/2"
- ✓ T de PVC de 1/2"
- ✓ Tubo de PVC de 1/2" para las conexiones del biol y salida del biogás
- ✓ Tubo de PVC 2" para la toma de alimentación
- ✓ Tapa sanitaria de 2" para sellar la toma de alimentación
- ✓ Manómetro
- ✓ Teflón
- ✓ Bote de pegamento PVC 1/4" galón (1 litro aproximadamente)

-
- ✓ Barra de silicona blanda industrial
 - ✓ 5 Barras de silicona caliente
 - ✓ Bote de pegamento tapa-goteras
 - ✓ Arandelas de plástico o un trozo de hule para hacer las arandelas manualmente

5.2 Herramientas necesarias

Esta es la lista de herramientas necesarias para la construcción del biodigestor:

- ✓ Taladro
- ✓ Brocas de 2" y 1/2" respectivamente.
- ✓ Terrajas para las tomas de 2" y 1/2"
- ✓ Limas
- ✓ Papel de lija
- ✓ Cúter
- ✓ Segueta
- ✓ Pistola de silicona caliente
- ✓ Pistola compresora para la silicona blanda

5.3 Construcción paso a paso

Paso 1: se realizan los huecos del drenaje en la zona central del fondo del digestor. Luego, la salida del biol debe realizar un poco más arriba de la mitad de los $\frac{2}{3}$ del total del recipiente, ya que el recipiente total se divide en 3 tercios, un tercio del espacio es para alojar el biogás y los dos tercios restantes para la mezcla de agua y estiércol con proporción 1:1. Luego, se deben hacer los huecos superiores del recipiente. Por un lado, se hace la toma de alimentación con un diámetro de 2", la toma del biogás y la recirculación de 1/2". Por último, se hace el hueco donde irá alojado el manómetro (puede ser normal o acoplarse un manómetro de construcción casera de columna líquida).



Figura 46 Orificio drenaje Biodigestor

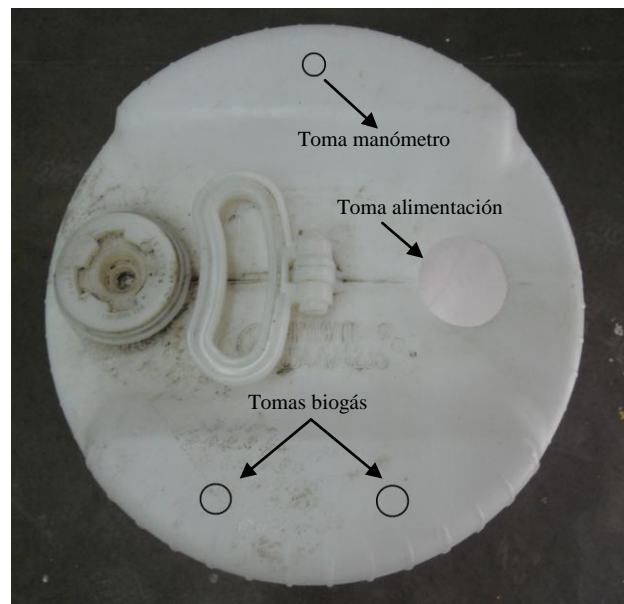


Figura 47 Orificios de alimentación, biogás y manómetro

Paso 2: Se hace el conexionado de los drenajes. Para ello, se utiliza un macho de roscar de 2" al que se le une un trozo de tubo de PVC de 2" y otro macho de roscar de 2" al otro lado. Las uniones se pegan con pegamento PVC anti-hongos. A este conjunto, se le une la llave metálica de bola de 2". Como trabajo previo, se debe llenar de teflón ambas roscas de PVC para la hora de hacer el conexionado de las diferentes piezas para evitar fugas. Como añadido, al hacer el conexionado de este conjunto al fondo del digestor, debemos poner una arandela de hule para que ayude a hacer el sello estanco.



Figura 48 Drenaje del digestor

Paso 3: Se procede a hacer el conexionado de la toma de salida del biogás junto con la toma de recirculación. Este conjunto, está formado por: 3 machos de roscar de PVC de 1/2", 2 codo de 90° de PVC, una conexión PVC en T, un tubo transparente (de largo que alcance hasta el fondo del digestor), tubo de PVC de 1/2", un codo de PVC de 1/2" de 90° y una llave metálica de bola de 1/2". Hay que hacer las conexiones, como aparecen en la figura 17, en la toma de recirculación se debe instalar el tubo transparente para hacer llegar el gas hasta la parte del fondo y que así sirva para agitar la masa de fermentación.



Figura 49 Conexiones superiores digestores batch



Figura 50 Imagen ampliada tomas superiores digester Batch

Paso 4: Por último, se procede a hacer la conexión del biol. Para ello, debemos utilizar, 2 machos de roscar de PVC de 1/2", 2 codos de 45° de PVC de 1/2", tubo de PVC de 1/2" y una llave metálica de bola de 1/2". Debe ir pegado todo el conjunto con pegamento de PVC y la llave debe llevar teflón en la parte que va roscada para evitar fugas.



Figura 51 Salida del Biol



Figura 52 Imagen ampliada salida biol

Paso 5: Fase de pruebas. Primero, se rellena el biodigestor con agua para comprobar y evitar que haya fugas en el drenaje. Segundo, se hace una solución jabonosa y se aplica en las diferentes tomas del digestor y con la ayuda de un compresor de aire se aplica presión dentro del digestor para comprobar la existencia de posibles fugas y reparar las mismas en caso de que se note burbujeo en alguna de las tomas inspeccionadas.

Paso 6: Una vez pasada la prueba de presión se puede cargar el digestor y ya comenzar a producir biogás. La salvedad que tiene este tipo de digestores es que no tienen gran capacidad de almacenaje y lo más sensato es realizar un gasómetro aparte donde ir almacenando el biogás producido a lo largo de la etapa de producción de biogás.

5.4 Consejos constructivos

En este apartado, se enumera una serie de consejos prácticos a la hora de construir el biodigestor con una doble finalidad: tener en cuenta ciertos consejos constructivos y por otro lado, evitar cometer los mismos errores que nos pasaron en nuestro proyecto

- La aplicación de arandelas de hule en cada toma que se haga es de vital importancia, al igual que la aplicación de teflón en las conexiones.
- Preparar bien la zona donde se van a hacer las conexiones para que el pegamento a utilizar funcione correctamente y se adhiera correctamente.

-
- Utilizar un pegamento adecuado para sellar las conexiones y evitar la mezcla de los mismos.
 - En caso de construir varios digestores a la vez, primero construir uno en su totalidad para solventar aislar los posibles problemas que sucedan y que no se repliquen en los otros equipos.

6 Laboratorio Biomasa UNI-UC3M

En este capítulo, se describe el Laboratorio de Biomasa que se ha construido y puesto en marcha durante la realización de este proyecto entre los meses de Julio a Octubre de 2010 en el Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios (RUPAP) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) gracias al Programa de Cooperación Interuniversitaria (PCI) entre la UC3M y la UNI.

6.1 Emplazamiento

El laboratorio de Biomasa ha sido establecido en uno de los espacios disponibles dentro del Taller Automotriz situado en el Recinto del RUPAP, que pertenece a la Facultad de la Tecnología de la Industrial (FTI) y que está supervisado por el Ingeniero René Vallejo. El local tiene unas dimensiones aproximadas de 3x4 m haciendo un total aproximadamente de unos 12 m².

6.2 Adecuación del laboratorio

El espacio concedido para establecer el laboratorio fue facilitado el día 17 de Agosto de 2010, 33 días después de haber llegado a Nicaragua. El espacio se estaba utilizando como trastero y se encontraba lleno de ordenadores antiguos que estaban en desuso. Después de ser vaciado por el personal de mantenimiento del RUPAP, el local quedó en las siguientes condiciones (figura 51).



Figura 53 Laboratorio antes del acondicionamiento

De este modo, se decide acondicionar el espacio con vistas a poder tener el espacio en las condiciones mínimas necesarias para poder tener aislada el área de trabajo y poder realizar en buenas condiciones los diferentes experimentos. También se hace este acondicionamiento con vistas a que también se pueda trabajar en condiciones normales para poder controlar, monitorizar y realizar el mantenimiento de los digestores y equipos del laboratorio.

En los trabajos de acondicionamiento se hicieron las siguientes mejoras:

- Instalación del cielo falso, cielo raso o falso techo
- Instalación láminas de aislamiento en la pared lateral contigua al otro despacho
- Se bajaron las luminarias a la altura del falso techo
- Se cambió la ventana de verja por una ventana de cristal

- Se pintó el local entero incluida la puerta, marco de las ventanas y el suelo
- Instalación de una cerradura de doble efecto



Figura 54 Laboratorio después del acondicionamiento

6.3 Equipos instalados

Con todo el material comprado se han instalado los siguientes equipos o aparatos:

- ✓ Estructura o soporte metálico para los digestores a temperatura ambiente
- ✓ Estructura o soporte metálico para los digestores en camisa de agua
- ✓ 3 Digestores a temperatura ambiente
- ✓ 2 Digestores en camisa de agua
- ✓ 1 Gasómetro de vasos comunicantes
- ✓ 1 Gasómetro de campana flotante

-
- ✓ 5 Gasómetros de neumático de coche
 - ✓ 1 Tanque de gas
 - ✓ 1 pHmetro
 - ✓ 1 Báscula de hasta 50 kg
 - ✓ 1 Termómetro con sonda
 - ✓ 3 Resistencias de pecera para los digestores en camisa de agua

6.4 Material y equipamiento del Laboratorio

Por otro lado, el laboratorio ha sido equipado con el siguiente material de trabajo:

- ✓ 1 Mechero bunsen
- ✓ 2 Bases estativas
- ✓ 2 Mallas de asbesto
- ✓ 2 Pinzas para matraz o bureta
- ✓ 2 Pinzas de refrigerante
- ✓ 2 Pissetas 500 ml
- ✓ 2 Manguitos metálicos
- ✓ 2 Pipetas de 250 y 100 ml respectivamente
- ✓ 2 Matraces aforados de 1 y 2 litros
- ✓ 2 Erlenmeyers de 450 ml y 300 ml
- ✓ 4 Beakers de capacidad 1 litro
- ✓ Mangueras conexas entre digestores y gasómetro
- ✓ Llave de paso gas

6.5 Ensayos realizados

Los primeros ensayos que si que se han podido realizar es la puesta en marcha de 4 biodigestores: 2 a temperatura ambiente y 2 en camisa de agua. Finalmente, se usaron estiércol de vaca y estiércol de cerdo, repitiendo el estiércol de vaca en ambos ambientes y haciendo un ensayo de codigestión en el segundo digestor en camisa de agua.

En el apartado de ensayos de las muestras de biogás previstos para hacer en el Laboratorio de Biomasa, en un principio, estaba proyectado el cálculo del valor del poder calorífico inferior de las muestras de biogás obtenidas de los diferentes sustratos en los diferentes ambientes de trabajo (temperatura aire libre y camisa de agua respectivamente). Con estos resultados, se debería contrastar con el poder calorífico inferior de un gas referencia.

Por otro lado, también se había planificado realizar el análisis de la composición de las muestras obtenidas mediante el uso de un aparato Orsat, pero debido al retraso que estaba sufriendo el proyecto cuando llegué a Nicaragua cuando se reformuló el proyecto, quedó como último punto dentro de los objetivos en caso de que hubiese tiempo, pero con los problemas tanto logísticos como contratiempos sucedidos durante mi estancia no fue posible. De hecho, por estos problemas que se tuvieron, durante mi estancia no fue posible acabar el gasómetro de campana flotante y por lo tanto, no se pudo encerrar el gas para poder realizar la prueba del calorímetro.

6.6 Proyectos de futuro

La idea principal de la puesta en marcha de este laboratorio es convertirlo en un aula dedicada totalmente a la parte académica donde los alumnos puedan seguir desarrollándose, desde hacer cursos relacionados con las energías renovables, prácticas de laboratorio hasta continuar haciendo otras monografías como continuación de este proyecto que mejore alguna de las facetas.

Algunas de las ideas de futuro de este laboratorio son:

- Involucrar a otras facultades dentro del RUPAP (FCT o FCYS) y con ello otras disciplinas de ingeniería para hacer un grupo multidisciplinar

-
- La concesión del espacio del jardín contiguo al laboratorio para ampliar las instalaciones y poner los gasómetros fuera por motivos de seguridad
 - Continuar la capacitación de los profesores responsables del Laboratorio en aspectos de las Energías Renovables para continuar mejorando
 - Montar e impartir algún curso sobre biodigestión y biogás
 - Obtener apoyo económico por parte de la FTI mediante la presentación de un Plan Operativo Anual (POA) sobre posibles usos del laboratorio

7 Presupuesto

En este capítulo se va a especificar y desglosar los gastos incurridos en el proyecto.

7.1 Acondicionamiento del Laboratorio

El acondicionamiento del local se le encargó al personal de mantenimiento del RUPAP previa solicitud de presupuesto.

Descripción	Unidades	Precio Unidad C\$	Importe Total C\$	Importe Total US\$	Importe Total €
Plycem 4 x 8 x 6mm	5	360	1.800	83,72	66,67
Lámina a 4x 2" x 3mm	16	68	1.088	50,60	40,30
Angular 1/2 x 12" de cielo	8	48	384	17,86	14,22
Croquis 1/2 de 12' de cielo	9	63	567	26,37	21,00
Alambre 18 Galvanizado	2	30	60	2,79	2,22
Cuartón de 2" x 4" x 5vrs	4	150	600	27,91	22,22
Clavo 1 1/2	1	25	25	1,16	0,93
Tornillo Gypsum 1/2 x 1/8	500	0,2	100	4,65	3,70
Tornillo Gypsum 1 x 1/8	3	8	24	1,12	0,89
Clavo 1" Acerado/Cielo	200	0,3	60	2,79	2,22
Vidrio Transparente 1 lmts	1	500	500	23,26	18,52
Galvanizado 6 1/2 x 12	1	360	360	16,74	13,33
Retenedores 1/2 x 12	1	90	90	4,19	3,33
Silicona Transparente	1	40	40	1,86	1,48
Golosos 2 1/2 x 6mm	2	8	16	0,74	0,59
Cerradura de parche Fanal	1	320	320	14,88	11,85
Tirador puerta	1	18	18	0,84	0,67
Alambre 2 x14	1	110	110	5,12	4,07
Pintura de Agua	1	280	280	13,02	10,37
Pintura de Aceite	2	330	660	30,70	24,44
Diluyente	2	45	90	4,19	3,33
Rodo Completo 6"	1	65	65	3,02	2,41
Brocha de 3"	1	42	42	1,95	1,56
Pintura Negra 1/4	1	90	90	4,19	3,33
	Sub Total		7.389	343,67	273,67
	Mano de Obra		2000	93,02	74,07
	Total		9.389	438,91	347,74

Tabla 13 Gastos acondicionamiento Laboratorio

7.2 Mobiliario Laboratorio

7.2.1 Estructuras metálicas para el soporte de los biodigestores y la mesa de laboratorio

Estos trabajos fueron encargados a 3 estudiantes que trabajan normalmente en el Taller Automotriz haciendo trabajos de soldadura para proyectos dentro y fuera de la Universidad. También, hacen trabajos de reparación a los utensilios del personal de mantenimiento del recinto.

Descripción	Unidades	Precio Unidad CS	Importe Total CS	Importe Total USS	Importe Total €
Tubo Estructura Cuadrado	8	170	1360	63,26	50,37
Angular 25x25x3x6000 mm	7	145	1015	47,21	37,59
Sierra de acero	9	23,14	208,26	9,69	7,71
Soldadura 6013 3/32	13	28,07	364,91	16,97	13,52
Soldadura 6013 1/8	4	28,07	112,28	5,22	4,16
Pintura metálica	2	277,3	554,6	25,80	20,54
Diluyente	2	146,7	293,4	13,65	10,87
Brocha 2"	3	12,81	38,43	1,79	1,42
Ruedas o rodos 3"	10	160,97	1609,7	74,87	59,62
Conjunto perno-tuerca seguridad-arandela presión	40	5,03	201,2	9,36	7,45
Tubo Cuadrado CH18	5	134,96	674,8	31,39	24,99
Tornillos	24	1,7	40,8	1,90	1,51
Tacos	20	0,71	14,2	0,66	0,53
Bisagra	2	9,9	19,8	0,92	0,73
Tornillos 3/4	40	0,35	14	0,65	0,52
Tornillos techo 1 1/2"	20	0,86	17,2	0,80	0,64
Lija de madera	4	6,2	24,8	1,15	0,92
Formica 1,22x2,44 m	2	254	508	23,63	18,81
Pegamento formica	2	176	352	16,37	13,04
Tirador puerta	1	15	15	0,70	0,56
Tiradores botón	2	8	16	0,74	0,59
		Subtotal	7454,38	346,72	276,09
		Mano de Obra	5967,00	277,53	221,00
		Total	13421,38	624,25	497,09

Tabla 14 Gastos soportes biodigestores y mesa laboratorio

7.3 Material y equipos laboratorio

El material y equipos del laboratorio fue adquirido en dos establecimientos especializados en Managua.

Descripción	Cantidad	Precio Unidad C\$	Importe Total C\$	Importe Total US\$	Importe Total €
Matraz volumétrico 1000ml	1	431,61	431,61	20,07	15,99
Matraz volumétrico 2000ml	1	539,51	539,51	25,09	19,98
Mechero de Bunsen	1	1337,20	1337,20	62,20	49,53
Matraz Erlenmeyer 2000ml	2	500,00	1000,00	46,51	37,04
Beaker 2000ml PK/4	1	2190,01	2190,01	101,86	81,11
Probeta graduada 1000ml clase A	2	1381,14	2762,28	128,48	102,31
Probeta graduada 250ml clase B	2	431,61	863,22	40,15	31,97
Pipeta clase A serial certificada	2	388,44	776,88	36,13	28,77
Aro metálico para soporte	2	41,33	82,66	3,84	3,06
Estativo o soporte de acero	2	475,15	950,30	44,2	35,20
Anillo P/colocar malla 100mm diam.	4	415,97	1663,88	77,39	61,63
pH metro digital bolsillo	1	2483,74	2483,74	115,52	91,99
Malla C/centro de ceramica	2	86,92	173,84	8,09	6,44
Termómetro digital YF-160A	1	1079,89	1079,89	50,23	40,00
Piseta 500ml.	2	128,90	257,80	11,99	9,55
Pinza para bureta metálica	2	550,70	1101,40	51,23	40,79
Manguito 20mm metálicos	2	378,82	757,64	35,24	28,06
Pinza de refrigerante cap. 80mm	2	661,96	1323,92	61,58	49,03
Balanza de plataforma elec.	1	6494,07	6494,07	302,05	240,52
		Total	26269,85	1221,85	972,96

Tabla 15 Gastos material Laboratorio

7.4 Construcción Biodigestores

En este apartado vamos a especificar los gastos incurridos para construir los 5 biodigestores, junto con el gasómetro de vasos comunicantes, los gasómetros de neumáticos, el gasómetro de campana flotante, el tanque de gas y los utensilios necesarios para el conexionado del calorímetro.

7.4.1 Biodigestores y gasómetro

Descripción	Unidades	Precio Unidad CS	Importe Total CS	Importe Total US\$	Importe Total €
Bidones de 25 galones (Pichingas)	5	280	1400	65,12	50,91
Bidones de 20 galones (Pichingas)	2	220	440	20,47	16,00
Resistencia pecera 50 l	3	565	1695	78,84	61,64
Válvula de globo metálicas de 1/2"	16	66,83	1069,28	49,73	38,88
Válvula de globo metálicas de 2"	5	494,54	2472,7	115,01	89,92
Codos PVC 1/2" de 90	10	1,63	16,3	0,76	0,59
Codos PVC 1/2" de 45	12	2,23	26,76	1,24	0,97
Uniones T de 1/2"	10	2,78	27,8	1,29	1,01
Adaptadores machos de 1/2"	64	1,58	101,12	4,70	3,68
Adaptadores machos de 2"	18	11,77	211,86	9,85	7,70
Tubería PVC 2"	1	165,05	165,05	7,68	6,00
Tubería PVC 1/2" drenaje biol y salida hasta gasómetro	1	82,525	82,525	3,84	3,00
Teflón de 1/2"	60	1,8	108	5,02	3,93
Pegamento PVC antihongos de 1/4 GLN	1	179,02	179,02	8,33	6,51
Manguera Transparente de 1/2"	33	4,35	143,55	6,68	5,22
Silicona transparente	6	107,42	644,52	29,98	23,44
Tornillos	20	0,4	8	0,37	0,29
Adaptador 3" a 2"	1	16,64	16,64	0,77	0,61
Adaptador de 4" a 3"	1	80	80	3,72	2,91
Tapa sanitario (2")	5	29,51	147,55	6,86	5,37
Abrasaderas / Bridas (Caja 20 piezas)	1	0	0	0,00	0,00
Manómetros Aquatec	5	73,55	367,75	17,10	13,37
Barras de Silicona Caliente	30	5	150	6,98	5,45
Llave inodoro	2	78	156	7,26	5,67
Conector ángulo plástico	2	1,99	3,98	0,19	0,14
Manguera Transparente de 1"	3	35	105	4,88	3,82
Manguera 1/4"	6	2,61	15,66	0,73	0,57
Manguera 5/16	3	3,91	11,73	0,55	0,43
Manguera 3/16	3	2,61	7,83	0,36	0,28
Tanque de gas 25 libras	1	1000	1000	46,51	36,36
Regulador presión	1	150	150	6,98	5,45
Manguera y bridas gas	3	60	180	8,37	6,55
Llave de paso	1	450	450	20,93	16,36
Adaptadores 3/8 bronce	5	100	500	23,26	18,18
Neumáticos coche	5	320	1600	74,42	58,18
Total			13733,63	638,77	499,40

Tabla 16 Gastos biodigestores y gasómetro

7.5 Otros gastos

Descripción	Unidades	Precio Unidad CS	Importe Total CS	Importe Total US\$	Importe Total €
Placa conmemorativa	1	1725	1725	80,23	62,73
Pichinga 20 litros	1	200,25	200,25	9,31	7,28
Bolsas Quintaleras	20	8	160	7,44	5,82
Combustible	1	1750	1750	81,40	63,64
		Total	3835,25	178,38	139,46

Tabla 17 Otros gastos

7.6 Mano de Obra

Concepto Mano de Obra	Importe Total CS	Importe Total US\$	Importe Total €
Acondicionamiento Laboratorio	2000,00	93,02	74,07
Soportes y Mesa	5667,00	263,58	209,89
Instalación Formica	300,00	13,95	11,11
Total	7967,00	370,56	295,07

Tabla 18 Gastos mano de obra

7.7 Resumen presupuesto Total

Concepto	Importe Total CS	Importe Total US\$	Importe Total €
Acondicionamiento Laboratorio	7389,00	343,67	273,67
Mobiliario Laboratorio	7454,38	346,72	276,09
Material y equipos	26269,85	1221,85	972,96
Biodigestores	13733,63	638,77	508,65
Otros gastos	3835,25	178,38	142,05
Mano de Obra	7967,00	370,56	295,07
Total	66649,11	3099,96	2468,49

Tabla 19 Resumen gastos PCI España - Nicaragua

8 Bibliografía

8.1 Páginas web

- [1] – Wikipedia – <http://es.wikipedia.org/wiki/Biodigestor> – [Octubre 2010]
- [2] – Yo biogás – <http://www.yobiogas.com/> – [Septiembre 2010]
- [3] – Blog Energía Casera. Tecnologías para generar tu propia energía – <http://energiacasera.wordpress.com/> – [Octubre 2010]
- [4] – Digestión Anaerobia – http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Anaerobic_digestion#History – [Octubre 2010]
- [5] – Biomasa y biogás – http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/SAN_JUAN/712/biogas_historia_usos_y_aplicaciones.htm – [Octubre 2110]
- [6] – Compostaje doméstico - <http://www.emison.com/5185.htm> - [Octubre 2010]
- [7] – Manómetro – <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/medidores/manometro/manometro.html> – [Octubre 2010]
- [8] – Calorímetro – <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt2006/07-Tecnologicas/2006-T-035.pdf> - [Octubre 2010]
- [9] – Orsat – <http://www.unet.edu.ve/~rarevalo/Documentos/ANALISIS%20ORSAT.pdf> – [Octubre 2010]
- [10] – Blog de un Grupo de mujeres de Santa Fe – <http://www.ruralcostarica.com/biogas.html> - [Octubre 2010]
- [11] – Diseño Biodigestores – http://www.engormix.com/disenio_biodigestores_s_articulos_976_POR.htm - [Octubre 2010]

8.2 Libros

[12] – Difusión de la Tecnología del Biogás en Colombia. Documentación del Proyecto. Cali 1987. GTZ y OEKOTOP

[13] – Guía Biodigestores – Jaime Martí Herrero – 2008

[14] – Manual Botero y Preston. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas – 1987

[15] – Manuales GTZ – <http://www.gtz.de/en/> – [Agosto 2010]

[16] – Phosphorus precipitation in Anaerobic Digestion Process by Nuria Martí Ortega – <http://www.bookpump.com/dps/pdf-b/1123329b.pdf> – [Octubre 2010].

8.3 Vídeos y enlaces de interés

[17] – Blog Biodigestor.net – <http://www.biodigestor.net/> – [Octubre 2010]

[18] – Construcción Biodigestor – http://www.enziclean.com/usos_porcino.htm – [Octubre 2010]

[19] – FAO – <http://www.fao.org/> – [Octubre 2010]